

Министерство образования и науки РФ  
Донской государственный технический университет  
Российский фонд фундаментальных исследований

# **ВОЛНОВЫЕ, ВИБРОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ, МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ**

**Сборник трудов  
международного научного симпозиума  
технологов-машиностроителей и механиков  
(Ростов-на-Дону, 7 – 10 октября 2014 г.)**



Ростов-на-Дону  
2014

УДК 621.048

В 74

В 74   **Волновые**, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей и механиков (Ростов-на-Дону, 7 – 10 октября 2014 г.). – Ростов н/д: ДГТУ, 2014. - 397с.

ISBN 978-5-7890-0962-8

В сборнике включены материалы международного научного симпозиума технологов- машиностроителей и механиков «Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях», отражающие научные и практические тенденции в области эффективного использования физических эффектов волновых и виброволновых процессов для решения технологических задач, направленных на изготовление высокотехнологичных изделий машиностроения, повышение качества и конкурентоспособности продукции.

Предназначен для научных работников ИТР и специалистов в области металлообработки.

**Сборник издается при поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований  
(грант № 14-08-20136)**

УДК 621.048

**Адрес организационного комитета:**

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1. ДГТУ,

Кафедра «Технология машиностроения»

НИИ «Вибротехнология», к.2-212

Тел. (863)2738-513, 2738-360,

E-mail: vibrotech@ mail.ru ; va.lebidev@yandex.ru

ISBN 978-5-7890-0962-8

© ДГТУ, 2014

# **І ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ, МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ.**

**УДК 621.9.048.6**

## **ВИБРОУДАРНАЯ И ВИБРОВОЛНОВАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, АВТОМОБИЛЬНОГО И Ж.Д. ТРАНСПОРТА)**

*Бабичев А.П., Бабичев И.А., Мотренко П.Д., Пастухов Ф.А.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия*

В статье формулируется проблема, стоящая перед сельскохозяйственным машиностроением, авиационной промышленностью, железнодорожным транспортом – повышение надежности и ресурса работы изделий, работающих в тяжелых условиях. Приводится сравнительная характеристика методов обработки, используемых для решения рассматриваемой проблемы.

Применение транспортных средств различного назначения находит широкое применение в нашей стране и в мировой практике. При этом отмечается рост объемов изготавливаемых и применяемых изделий и их совершенствование. Увеличение жизненного цикла изделий автомобильного и железнодорожного транспорта, авиационной и сельскохозяйственной техники, улучшение их эксплуатационных характеристик является предметом изыскания путей решения упомянутых задач технологов и конструкторов машиностроения. В практике находит применение широкий спектр технологических методов и операций упрочняющей обработки деталей упомянутых типов изделий. Среди них в последние годы получили распространение методы виброударной и виброволновой упрочняющей обработки [1, 2].

Ниже приведены некоторые примеры применения упомянутых методов обработки для повышения качества поверхности и

эксплуатационных свойств деталей транспортных средств различного назначения.

Виброударная обработка коленчатых валов тракторных и судовых двигателей осуществляется в рабочей камере объёмом 100 и 350 дм<sup>3</sup>. Каждый вал размещается в специальном приспособлении, позволяющим ему вращаться вокруг своей оси под динамическим воздействием рабочей среды и её циркуляционного движения для равномерной обработки поверхности детали. Приспособление жёстко крепится к стенкам рабочей камеры, т.е. была выбрана схема, обеспечивающая наибольшую интенсивность процесса. В качестве рабочей среды использовалась смесь стальных шаров диаметром 8... 12 мм, продолжительность процесса при  $A = 3$  мм и  $f = 25$  Гц составила 60 минут. При этом достигается равномерное упрочнение поверхностного слоя всех элементов детали, отделка и скругление острых кромок, плавность переходов, исключение поводки нежестких валов имеющей место при избирательной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей. Сравнительные испытания усталостной прочности исходных и упрочнённых валов проводилась на специальном стенде в институте машиностроения АН БССР. Полученные положительные результаты позволили рекомендовать процесс вибруударного упрочнения коленчатых валов для повышения их усталостной прочности и исключения нежёстких валов на основе всесторонней и одновременной обработки всех элементов детали.

### **Методика экспериментальных исследований.**

Эффективной является ВиО шатуна двигателя. Достаточно равномерно обрабатывается вся его сложная поверхность. Отделка и упрочнению подвергаются галтели и кромки.

Вибрационное упрочнение галтелей клапанов двигателя, изготовленных из стали 40ХН, осуществлялось в среде закалённых шлифованных роликов из стали ШХ-15 (HRC 62...64, размеры 20 × 20, вес ролика 50 г). Режим и продолжительность обработки:  $A = 2,5$  мм,  $f = 33,3$  гц,  $t = 120$  мин. Обработка осуществлялась при непрерывной подаче ТЖ в виде 2%-го водного раствора каль- цинированной соды.

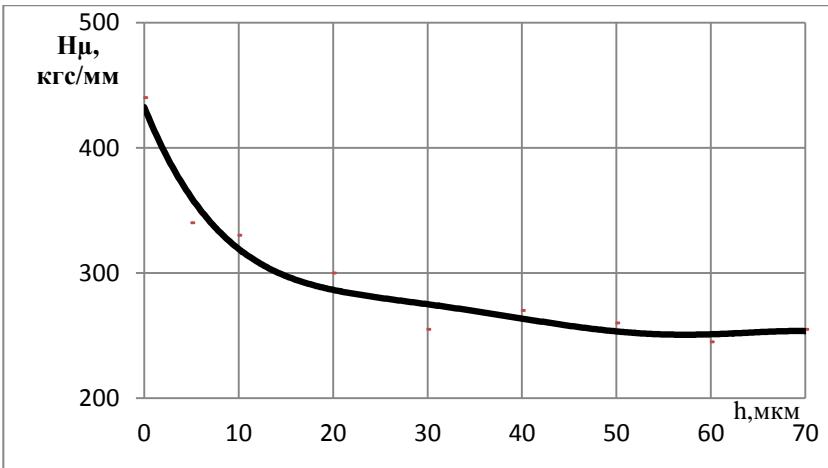


Рис.1. Изменение микротвердости по глубине сечения галтели клапана двигателя

Исследована возможность применения ВиО для повышения долговечности и надёжности зубьев шестерён коробки передач зерноуборочного комбайна. Шестерни изготавливаются из стали 25ХГ и подвергаются нитроцементации и термообработке до  $HRC \geq 56$ . Из-за конструктивных и эксплуатационных особенностей торцы шестерён при переключении скоростей подвергаются высоким контактным давлениям ударного характера, от которых преждевременно разрушаются их поверхности. Направленное изменение параметров качества поверхностного слоя торцев зубьев шестерён в результате виброударной обработки способствует повышению их долговечности и надёжности.

Сравнительным испытаниям подвергались шестерни коробки скоростей малого токарного станка ( $m = 2 \text{ мм}$ ), прошедшие шпиндельную виброотделку. Обработка производилась в среде шлифзера КЧ32, увлажненного 2%-ным водным раствором кальцинированной соды. Режимы и продолжительность обработки:  $P_{ш} = 3000 \text{ об/мин.}$ ,  $A = 2,5 \text{ мм}$ ,  $\Pi_{к} = 2000 \text{ кол/мин}$  (33 Гц),  $t = 5 \text{ минут}$ , реверсивное вращение шпинделя - через 2,5 минуты. Скругление кромок достигало  $r = 0,5...0,8 \text{ мм}$ .

Из обработанных шестерён были собраны две коробки скоростей, и проведены сравнительные испытания на шумность. Сравнивались коробки скоростей с шестернями, изготовленными

по технологии завода и шестернями прошёдшими шпиндельную виброотделку. В обоих случаях сравнивалась шумность с эталонной коробкой скоростей. При этом установлено, что коробки скоростей, собранные из шестерён, изготовленных по технологии завода, для снижения шума до уровня эталона проходят приработку в течение 4...7 часов. Коробки скоростей с шестернями, прошёдшими шпиндельную виброотделку, после сборки не превышают уровень шума эталона и дополнительной приработки не требуют. Кроме того, при эксплуатации отмечается лучшая включаемость шестерён, прошёдших шпиндельную виброотделку.

В практике встречаются изделия, детали которых работают в тяжёлых условиях эксплуатации: без смазки, в среде жидкого водорода, при больших контактных давлениях. Износостойкость и долговечность таких деталей, в частности зубчатых передач, часто оказываются недостаточными. Возможность применения процесса виброударной обработки с целью повышения их долговечности и надёжности проведена на шестернях и колёсах, изготовленных из стали 30ХЗВА, азотированной на глубину до 0,65 мм и термообработанной до  $HRC \geq 60$ . Сравнительные испытания зубчатых передач, обработанных по разным технологическим схемам, проведены на специальных стендах в среде жидкого азота (при температуре  $T = -196^{\circ}\text{C}$ ) при  $a_k = 12500 \text{ кгс}/\text{см}^2$  и  $M_{kp} = 5213 \text{ кгс} \cdot \text{см}$ .

Результаты испытаний зубчатых передач показали, что у прошёдших виброударную обработку деталей износостойкость увеличилась в среднем на 30% по сравнению с базовыми (исходными), долговечность в 2 раза. Процесс виброударной обработки шестерён и колёс зубчатых передач был внесён разработчиком в ТУ на изготовление изделия.

Разработана технология и специальное оборудование вибрационной обработки шестерён тяговой передачи электровоза. Вибрационная обработка деталей осуществляется после фрезерования и термической обработки. ВиО осуществляется с целью удаления окалины и заусенцев, скругления кромок торцов зубьев и снижение шероховатости их рабочей поверхности, в том числе впади зубьев. Материал детали - сталь 20ХНЗА; поверхность зубчатого венца подвергается цементации и закалке ( $HRC 60\dots63$ ). Размеры детали: наружный диаметр -

400 мм, высота - 100 мм, вес - 50 кг, ш = 10 мм, z = 23. Специальное оборудование предусматривает одновременную обработку 5 деталей, устанавливаемых на медленно вращающихся шпинделях (круговая подача) с целью обеспечения равномерной обработки зубьев. Вибрационная обработка (по результатам исследований) обеспечивает удаление окалины, съем заусенцев и скругление кромок зубьев, снижение шероховатости поверхности составило от Ra 4,5 - 3 мкм до Ra 1 - 1,5 мкм.

В НИИ «Вибротехнология» ДГТУ созданы и исследованы оригинальные конструкции многоконтактных виброударных инструментов для упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). Промышленная апробация произведена на операциях упрочнения фасонных поверхностей силовых деталей, в том числе сварных швов. Проведенные испытания упрочненных сварных швов показали хорошие результаты: разрушения в результате испытаний происходят по основному материалу, упрочненный сварной шов оказался прочнее основного материала. Указанный инструмент и технология могут быть использованы для упрочнения сварных швов стыков железнодорожных рельс, рамных конструкций бандажей и осей колес подвижного состава и т.п. Инструмент удобен в эксплуатации, может применяться в заводских условиях, ремонтных мастерских, на линии и в полевых условиях.

Многоконтактный виброударный инструмент может быть применен для упрочнения рабочих поверхностей путевых (рельсовых) крестовин с целью повышения их износостойкости. Большой интерес представляет отделочно-упрочняющая обработка пружин и рессор подвижного состава методом виброударной и виброволновой механо-термической обработки и алюминирования (совмещенный процесс упрочнения и образования алюминиевого покрытия). Для реализации разработан технологический процесс, спецоборудование; произведена практическая апробация на Белорецком специализированном заводе по изготовлению широкой номенклатуры пружин и на Одесском заводе «Стройгидравлика». Получены положительные результаты, повышение долговечности пружин при усталостных испытаниях составляют

30...40% и более. Указанным методом возможно образование покрытий из порошков цинка, алюминия, титана, графита, дисульфида молибдена, меди.

Разработан процесс вибрационного механохимического цинкования с целью образования цинковых покрытий широкой номенклатуры деталей. Практическая апробация технологии ВиМХЦ осуществлена совместно с Тихорецким заводом путевых машин на деталях крепежа и с заводом «Автозапчасть» на деталях типа тормозных пластин. При ВиМХО возможно образование других видов покрытий (оксидирование, меднение, фосфатирование).

С КБ авиационных двигателей «Сатурн» (г. Москва), выполнены работы по образованию покрытий  $M_0S_2$  на детали и узлы, работающие в условиях критических нагрузок при форсированных режимах работы двигателя: нанесение такого же покрытия на рабочие поверхности гидроцилиндров из титанового сплава. Образование покрытий осуществляется при совмещенном процессе виброударной обработки и образования пленки дисульфида молибдена.

Виброударная упрочняющая и стабилизирующая обработка крупногабаритных нежёстких коленчатых валов дизелей выполнена и апробирована совместно с предприятиями транспортных двигателей г. Барнаул. Аналогичные работы выполнены для повышения качества и долговечности коленчатых и распределительных валов автомобильных и тракторных двигателей (Минский моторный завод); Саратовский завод «Автотракторозапчасть» г. Саратов) Виброударная и виброволновая обработка может быть эффективно использована для упрочнения штамповочного инструмента и режущих инструментов.

Некоторые примеры практической апробации результатов исследований приведены на рис. 2 а,б,в,г.

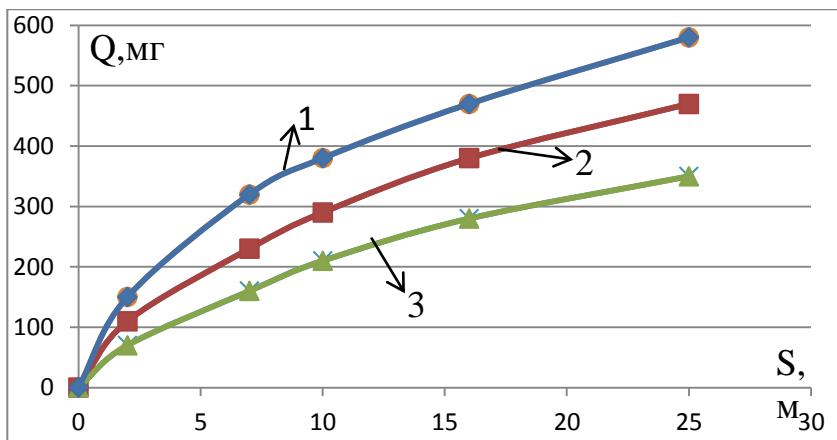


Рис.2а. Влияние виброударной обработки на суммарный износ пар трения образцов при различных условиях испытания в зависимости от величины пути трения  $S$ . Материал образцов – сталь У12, состояние образцов: 1 – шлифование со шлифованием; 2 – шлифование с виброупрочнением; 3 – виброупрочнение с виброупрочнением

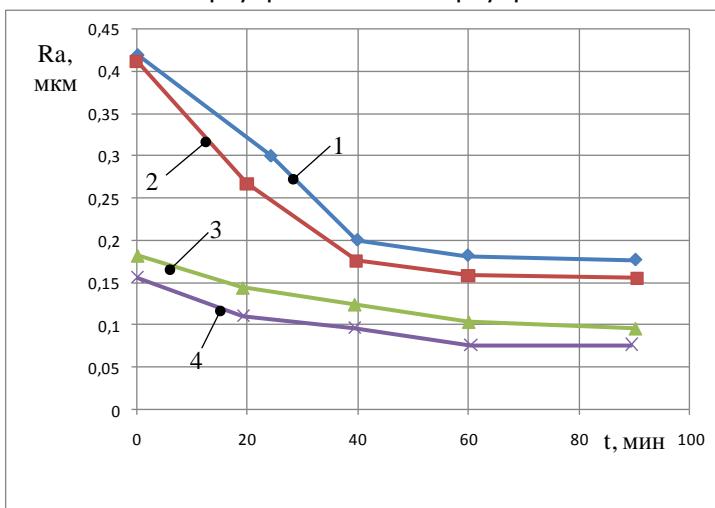


Рис.2б. Влияние времени ( $t$ ) виброударной обработки и амплитуды колебаний ( $A$ ) на изменение шероховатости ( $R_a$ )  
1- 3 - амплитуда  $A=2,5$  мм, 2-4- амплитуда  $A=3$  мм; шар  $d = 8$  мм  
(материал образцов: P18; Р6К5; Х12М)

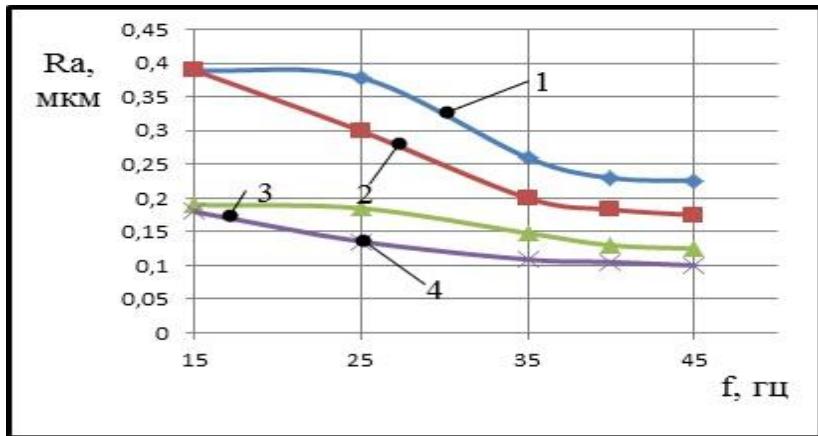


Рис.2в. Влияние частоты колебаний ( $f$ ) и диаметра шара на изменение шероховатости поверхности ( $R_a$ ): 1, 3 – шар  $d=8$  мм; 2, 4 – шар  $d=11$  мм; (материал образцов: сталь Р18; Р6К5; Х12М)

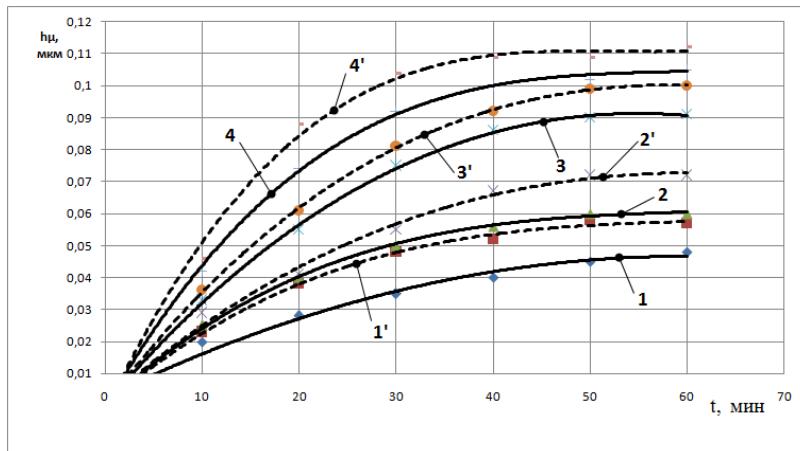


Рис.2.г. Влияние амплитуды колебаний, времени обработки и диаметра шара на глубину упрочнения ( $h_\mu$ ) стали Х12М, Р6М5, Р18: 1, 2, 3, 4 -  $d=8$  мм; 1', 2', 3', 4' -  $d=14$  мм; 1, 1' –  $A=1,5$  мм; 2, 2' –  $A=2$  мм; 3, 3' –  $A=2,5$  мм; 4, 4' –  $A=3,5$  мм; (время ВиО – 40 мин, частота колебаний  $f=35$  Гц), исходная шероховатость поверхности  $R_a = 0,42$  мкм

- 
1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. - Ростов-н/Д: ДГТУ, 1999. -620с.
  2. Бабичев А.П., Мотренко П.Д. и др. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. - Ростов-н/Д, ДГТУ, 2003г. 192с.
  3. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 2004. - 287с.
  4. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием, - М.: Машиностроение, 2002. - 299 с.
  5. Суслов А.Г., Рыжов Э.В., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. - М.: Машиностроение, 1979. – 176.
  6. Ганиев Р.Ф., (под ред.) Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. – Киев. Техника 1980г.
  7. Фортов В.Е., Избранные статьи и доклады.- Черноголовка: ИГХФ РАН, 2005-575с.

**УДК 621.048**

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ  
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРОАБРАЗИВНОЙ  
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

Тамаркин М.А., Вяликов И.Л., Тищенко Э.Э.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия

Основное влияние на качественные и эксплуатационные показатели деталей оказывают финишные операции. Задача повышения качества продукции связана с совершенствованием известных и разработкой новых, эффективных методов финишной обработки, среди которых ведущее место занимают методы вибраобразивной обработки (ВиО). Большой интерес специалистов к этому процессу объясняется его широкими технологическими возможностями и существенными технико-экономическими преимуществами. Область использования вибрационной технологии в различных отраслях производства достаточно многогранна и имеет тенденцию к дальнейшему расширению.

Непрерывное совершенствование процесса ВиО приводит к созданию новых её разновидностей. Одним из перспективных и малоизученных направлений повышения эффективности процесса ВиО является его интенсификация за счет наложения ультразвукового поля.

Применение ультразвука для интенсификации технологических методов обработки деталей объясняется его уникальными особенностями. Так в ультразвуковом диапазоне можно получить направленное излучение, оно хорошо поддаётся фокусировке, в результате чего повышается интенсивность ультразвукового поля на ограниченном участке. При распространении в различных средах и твёрдых телах ультразвук порождает интенсивные явления, многие из которых нашли применение в различных сферах человеческой деятельности, в том числе и технологических целях. Метод виброабразивной ультразвуковой обработки (ВиАУЗО), в зависимости от режимов и характеристики рабочей среды, может быть применен для изготовления деталей машин и приборов на операциях шлифования, полирования, удаления заусенцев и облоя и т.п.

Особенностью виброабразивной ультразвуковой обработки является то, что в процессе обработки поверхности деталей одновременно подвергаются динамическому воздействию потоков абразивных гранулированных частиц, движение которых инициируется низкочастотными колебаниями стенок рабочей камеры и кавитационно-абразивному разрушению, обусловленному ультразвуковым полем, генерируемым ультразвуковым преобразователем. Несмотря на то, что ведущим процессом в условиях ВиАУЗО является виброабразивный, осуществляющий съем металла и формирование параметров качества поверхностного слоя на микроуровне, введение ультразвукового поля позволяет активировать процессы кавитационно-абразивного разрушения и обеспечить обработку микронеровностей на субмикроуровне. В совокупности эти два процесса обеспечивают повышение производительности финишной отделки деталей. В этой связи очень важно для практического применения этого метода в технологии изготовления деталей машин иметь научно обоснованные расчётно-аналитические зависимости, устанавливающие связь параметров качества поверхностного слоя и производительности процесса с технологическими режимами и условиями обработки. Именно с этой целью был проведен комплекс теоретических исследований.

В процессе обработки свободными абразивами, как отмечают многие исследователи [1,2, 3 и др.] , изменение шероховатости поверхности имеет экспоненциальный характер. Скорость образования нового рельефа снижается от максимального значения в начальный период до значений, мало отличающихся от нуля к моменту образования установившейся шероховатости, что свидетельствует о формировании непрерывно воспроизводимого рельефа поверхности. Каждой комбинации технологических параметров соответствует такая удельная плотность взаимодействий и такой уровень энергии абразивных гранул, которые однозначно определяют как продолжительность периода  $t_{Ra_{уст}}$ , так и высотные параметры установившегося рельефа.

Формирование шероховатости поверхности при вибрабрзивной обработке с наложением ультразвукового поля приводит к ещё большей сложности описания изменения шероховатости обрабатываемой поверхности. Разработать теоретические зависимости для этого описания в настоящее время не представляется возможным. Учитывая результаты предварительных исследований, можно предложить воспользоваться для определения установившейся шероховатости поверхности при ВиАУЗО известными теоретическими зависимостями для ВиО с добавлением соответствующих эмпирических коэффициентов, учитывающих уменьшение величины установившейся шероховатости за счёт кавитационно-абразивного разрушения вершин микронеровностей.

В работе [1] предложена зависимость для расчёта среднего арифметического отклонения установившейся шероховатости. Применительно к ВиАУЗО её можно записать как

$$Ra_{yсm} = 0,09 \cdot K_{yz} \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot L_{ed}}{z_0}}, \quad (1)$$

где  $K_{yz}$  – коэффициент ультразвукового воздействия,  $h_{\max}$  - максимальная глубина внедрения частицы,  $L_{ed}$  –единичная длина,  $z_0$  - количество абразивных зерен над единицей поверхности связки гранулы.

Учитывая экспоненциальный характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности детали при обработке свободными абразивами, зависимость изменения значений этих параметров в функции от времени обработки при ВиАУЗО представим в виде:

$$Ra = (Ra_{ucx} - Ra_{yct}) \exp(-K_{uyz} \cdot t) + Ra_{yct} \quad (2)$$

где  $Ra_{ucx}$  - среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости;  $Ra_{yct}$  - среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости;  $K_{uyz}$  - коэффициент интенсивности изменения шероховатости поверхности, зависящий от режимов обработки и характеристик рабочих сред,  $t$  - время обработки.

Проведен значительный объем экспериментальных исследований ВиАУЗО с целью изучения влияния распространения ультразвуковых колебаний на шероховатость поверхности детали. Основной задачей экспериментальных исследований качества поверхности было установление влияния ультразвукового поля на изменение геометрических характеристик шероховатости поверхности, формируемой в процессе ВиАУЗО, а также приемлемости предложенных аналитических зависимостей для их оценки при проектировании технологии отделки деталей этим методом.

Для решения этой задачи обработке подвергались плоские образцы (20x20 мм) толщиной 2 мм из стали 45 и алюминиевого сплава Д16Т с исходной шероховатостью 3,7 мкм и 8 мкм соответственно. Одновременно обрабатывалось по пять образцов из каждого материала. Через каждые 10 мин обработка прекращалась, образцы тщательно промывали и сушили. Затем на портативном профилометре SURFTESTSJ-210 снимались параметры шероховатости на пяти участках. Обработка производилась до достижения шероховатости, параметры которой оставались неизменными при дальнейшей обработке.

Для оценки влияния ультразвукового поля на формирование установившейся поверхности исследования предусматривали серию экспериментов с включённым и отключённым цилиндрическим магнитострикционным

преобразователем. Результаты исследований представлены на рис. 1-4.

Ra, мкм

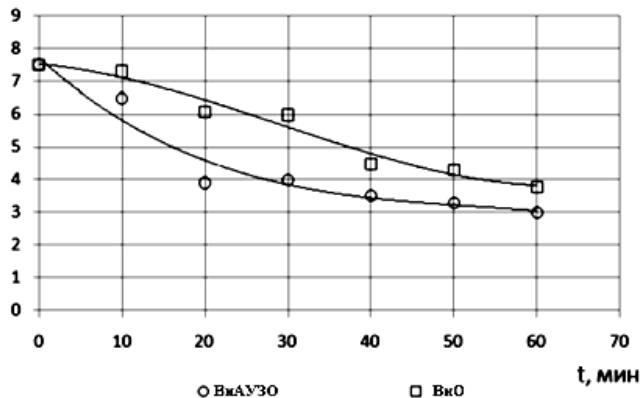


Рис. 1. Изменение параметра  $Ra$  при ВиО и ВиАЗО образцов из сплава Д16Т

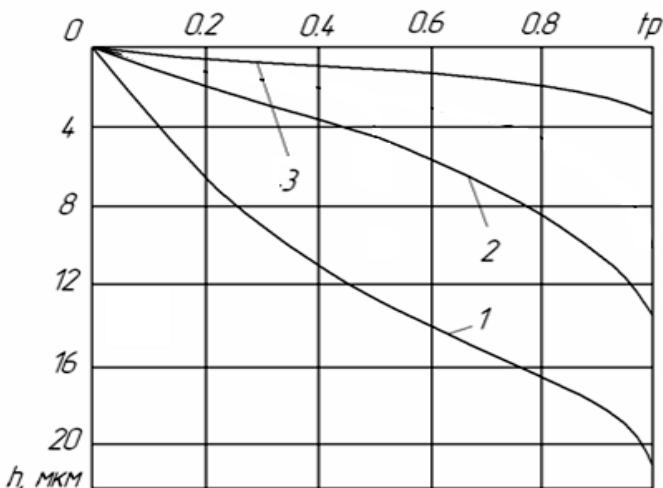


Рис. 2. Изменение опорных кривых в процессе ВиО и ВиАЗО образцов из сплава Д16Т: 1 – исходный профиль,  $Ra = 7.04$  мкм; 2 – ВиО, 60 мин,  $Ra = 3.94$  мкм; 3 – ВиАЗО, 60 мин,  $Ra = 3.05$  мкм

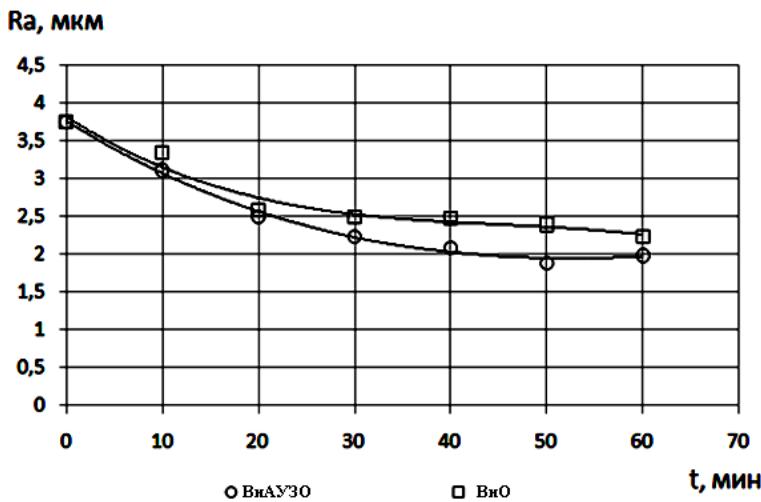


Рис. 3. Изменение параметра  $Ra$  при ВиО и ВиАЗО образцов из стали 45

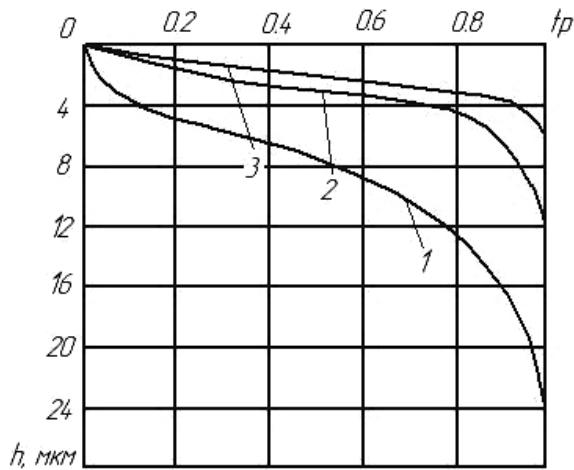


Рис.4. Изменение опорных кривых в процессе ВиО и ВиАЗО образцов из стали 45: 1 – исходный профиль,  $Ra = 3.64$  мкм; 2 – ВиО, 60 мин,  $Ra = 2.26$  мкм; 3 – ВиАЗО, 60 мин,  $Ra = 2.37$  мкм

По результатам экспериментальных исследований установлено:

– после ВиАУЗО на поверхности обрабатываемой детали образуется развитый субмикрорельеф, что является следствием активно протекающих в ультразвуковом поле при обработке процессов кавитационно-абразивного разрушения;

– при ВиАУЗО время обработки до достижения идентичных параметров шероховатости на поверхности сокращается в 1,2 раза по сравнению с вибоабразивной обработкой;

– опорная кривая профиля шероховатости на начальном участке при ВиАУЗО располагается выше, чем у аналогичного профиля шероховатости, достигаемого при ВиО;

– при ВиАУЗО высотные параметры установившейся поверхности отличаются от высотных параметров установившейся поверхности, достигаемой при ВиО, в 0,9 раза, что свидетельствует о преимущественном удалении вершин микронеровностей за счёт кавитационно-абразивного разрушения. Это отличие позволяет коэффициент ультразвукового влияния  $K_{yz}$  в формуле расчёта установившейся шероховатости принять равным 0,9;

В таблицах 1 и 2 представлены сравнительные данные экспериментальных и расчётных значений параметра  $Ra$ , определённые по предложенной ранее аналитической зависимости (1).

Таблица 1.

Сравнительный анализ расчётных и экспериментальных значений параметра  $Ra(\text{мкм})$  при ВиАУЗО образцов из сплава Д16Т

Продолжительность обработки, мин	10	30	60
Экспериментальные значения $Ra$	6,3	4	3,1
Расчётные значения $Ra$	5,45	3,41	2,64
Погрешность, %	13,5	14,7	14,85

Таблица 2

Сравнительный анализ расчётных и экспериментальных значений параметра Ra(мкм) при ВиАУЗО образцов из стали 45

Продолжительность обработки, мин	10	30	60
Экспериментальные значения Ra	3,25	2,23	1,98
Расчётные значения Ra	2,76	1,91	1,72
Погрешность, %	15,2	14,1	13,11

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод, что предложенная расчётная модель шероховатости поверхности достаточно объективно учитывает факторы и явления, оказывающие влияние на протекание процесса ВиАУЗО, и позволяет с достаточной точностью (в пределах 20%) прогнозировать влияние технологических режимов и условий ВиАУЗО на качество поверхности.

---

1. Тамаркин, М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.02 / М.А. Тамаркин. – Ростов н/Д, 1995. – 299 с.

2. Бабичев, А.П. Инструментальное обеспечение процессов обработки деталей в гранулированных средах: моногр. /А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, С.А. Костенков, О.А. Рожненко; ДГТУ. – Ростов н/Д, 2011. – 267 с.

3. Димов, Ю.В. Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Ю.В. Димов. – Иркутск, 1987. – 543 с.

## УДК 621.787.6.004

### ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Медведев М.Н.

ЮЗГУ, г. Курск; ВГУ имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Муром

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – эффективный способ упрочнения, после которого в поверхностном слое повышается твердость, возникают

сжимающие остаточные напряжения, что наряду с улучшением микрографии поверхности приводит к значительному повышению эксплуатационных параметров деталей машин. Упрочнение отверстий ППД является сложной технологической операцией, что обусловлено закрытостью обрабатываемой поверхности и соответственно трудностями, связанными с ориентацией инструмента и подвода СОТС. Особенно это проявляется при малом диаметре (менее 100 мм) и большой глубине отверстий (более 150 мм). Для деформационного упрочнения таких отверстий обычно применяется дорнование, при котором инструмент – дюрн, либо шар под действием статической нагрузки проходит через упрочняемое отверстие, формируя наклепанный слой с высокой твердостью и низкой шероховатостью. При этом, когда необходимо создание глубины упрочнения более 1...1,5 мм, например для тяжелонагруженных деталей машин, таких как корпуса гидро- и пневмоцилиндров, траки гусеничных машин, втулки для базирования фрез и др. прикладываемая к инструменту нагрузка должна достигать 200...400 кН, что приводит к повышению энергоемкости процесса.

Статико-импульсная обработка (СИО) новый способ упрочнения ППД. Технология СИО заключается в предварительном статическом и последующем ударно-импульсном нагружении. Ударная нагрузка при СИО более эффективно воздействует на упрочняемый материал за счет использования волновых процессов, возникающих при ударе. Упрочнение отверстий СИО ранее осуществлялось по аналогии с классическим дорнованием по схеме прошивания [1-3]. Дюрн (деформирующая прошивка) либо шар проталкивался вдоль упрочняемого отверстия толкателем – волноводом под действием комбинированной статической и ударной нагрузки. Такая схема может использоваться для отверстий не большой длины ( $L/d < 5...7$ , где  $L$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр упрочняемого отверстия), чтобы избежать большого отклонения оси отверстия.

Для СИО длинномерных отверстий по схеме протягивания, разработан экспериментальный стенд, где боек имеет форму гильзы и имеет возможность свободного перемещения вдоль вертикально расположенного волновода. К

верхней части волновода крепится дорн, на нижней – имеется уступ, о который ударяется боек, стремясь переместить его вместе с инструментом вниз относительно неподвижно установленной заготовки. Перемещение бойка вдоль волновода вверх (взвод) может осуществляться механизмами, основанными на различном принципе действия (например, электромеханическом), вниз – под действием силы тяжести. Для создания предварительного статического поджатия инструмента к упрочняемой заготовке к нижнему торцу волновода через систему полиспастов закрепляются различные грузы.

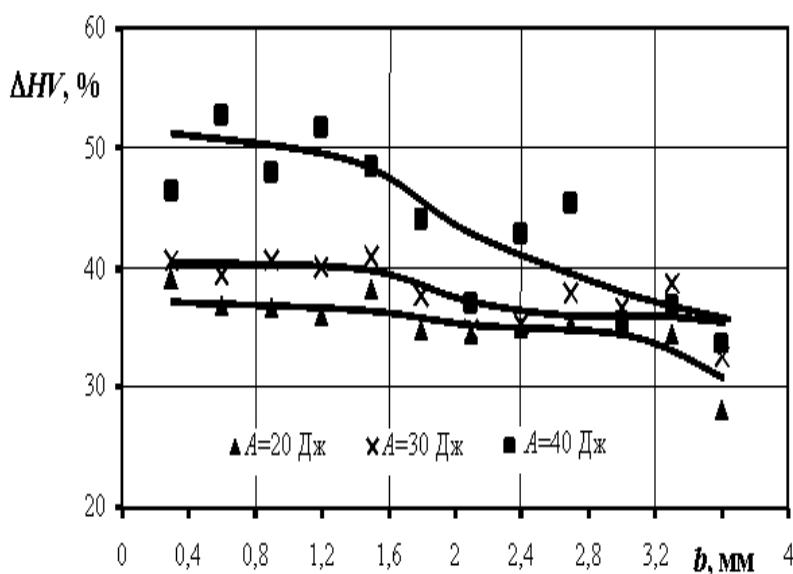
Для установления технологических возможностей процесса упрочнения СИО отверстий по предлагаемой схеме были проведены экспериментальные исследования на следующих режимах: энергия ударных волн  $A = 20\ldots40$  Дж, сила статического поджатия  $P_{ct} = 7,5$  кН, натяг  $i = 0,4\ldots0,8$  мм. Исследования проводились на образцах из стали 45 с исходной твердостью 2100 МПа, исходная шероховатость упрочняемой поверхности образцов составила  $Ra = 10\ldots13$  мкм. Размеры упрочняемых образцов: наружный диаметр 37,5…41,9 мм, внутренний диаметр 29,5…29,9 мм, соответственно толщина стенки образцов  $b = 4\ldots6$  мм. В качестве инструмента использовался однокольцевой дорн размерами: угол заборного конуса  $\alpha = 8^\circ$ , угол задней части  $\gamma = 10^\circ$ , диаметр калибрующего пояска 30,3 мм, ширина пояска 3 мм [2].

Проведенными исследованиями установлено, что после упрочнения ударными волнами твердость увеличивается по всей толщине стенки образца. Максимальная степень упрочнения зафиксирована у поверхности отверстия и достигала 60 %. Установлено, что степень упрочнения повышается с увеличением натяга и энергии ударных волн деформации. Так при упрочнении СИО образцов с  $b = 4$  мм, при натяге  $i = 0,8$  мм, максимально достигаемая степень упрочнения при энергии  $A = 20$  Дж составила 38 %, при  $A = 30$  Дж – 41 %, при  $A = 40$  Дж – 53 % (рис. 1).

Установлено, что шероховатость упрочненной поверхности снижается при любых режимах в исследуемом диапазоне. В большей степени снижению шероховатости способствует увеличение натяга и увеличение толщины стенки образцов. Увеличение энергии ударных волн уменьшает

снижение шероховатости. Так при упрочнении СИО образцов с  $b = 4$  мм, при натяге  $i = 0,8$  мм, с исходной шероховатостью поверхности  $R_a = 11,7$  мкм, при энергии  $A = 20$  Дж параметр шероховатости  $R_a = 1,43$  мкм, при  $A = 30$  Дж –  $R_a = 2,71$  мкм, при  $A = 40$  Дж –  $R_a = 4,62$  мкм. При этом с увеличением энергии ударных волн шероховатость поверхности принимает профиль с характерными чередующимися микровыступами и впадинами, что часто благоприятно влияет на износостойкость поверхности.

Проведенные исследования показали возможность осуществления статико-импульсной обработки длинномерных отверстий малого диаметра, что расширяет технологические возможности и диапазон применения деформационного упрочнения.



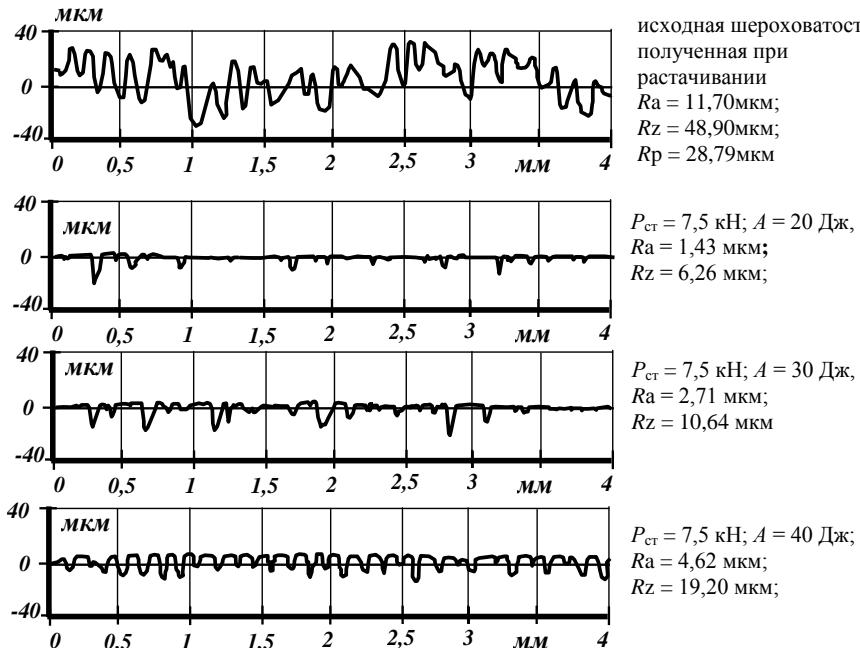


Рис. 1. Влияние энергии ударных волн ( $A$ , Дж) на распределение степени упрочнения ( $\Delta HV$ , %) по толщине упрочняемой стенки отверстий втулок ( $b$ , мм) и на шероховатость поверхности при СИО с натягом  $i = 0,8$  мм

**Исследования выполнены при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках инновационного проекта по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса-2013»**

---

1. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Поляков А.В. Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 6. С.14-16

2. Особенности формирования упрочненного поверхностного слоя отверстий статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, А.В. Поляков, А.В. Волобуев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. 2011. № 6. С. 84-89

3. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Медведев М.Н. Возможности статико-импульсного деформационного упрочнения отверстий деталей машин // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Сб. трудов междунар. научн.-техн. конф. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – С. 276-280

**УДК 621.9.048:620.22+621.787.6.004**

**ВОЛНОВАЯ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА  
ДЕТАЛЕЙ КОЛЕБЛЮЩИМСЯ РОЛИКОМ С  
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО  
СЛОЯ**

*Бутенко В.И.*  
ЮФУ, г.Таганрог, Россия

Исследования показывают [1, 2], что создаваемые в зоне обработки волновые процессы любой природы могут существенным образом повлиять на формирование эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя обрабатываемой детали. Перспективным в этом направлении является создание при отделочно-упрочняющей обработке (ОУО) деталей в зоне контакта упрочняющего инструмента с обрабатываемой поверхностью направленных волновых процессов, вызванных, например, вынужденными колебаниями упрочняющего ролика. Разработаны конструкции отделочно-упрочняющих инструментов с колеблющимся роликом для обработки цилиндрических и плоских поверхностей деталей [3 – 10], в которых поверхностная пластическая деформация материала детали осуществляется роликом, имеющим постоянное радиальное усилие при сообщении ему движения подачи и колебательных движений посредством линейного шагового двигателя, а также дополнительного возвратно-поступательного перемещения, параллельного движению подачи. В результате сложно-винтовой траектории движения инструмента на поверхности детали формируется регулярный микропрофиль с заданным шагом в виде пересекающихся волн определённой амплитуды и шага в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов обработки. Для настройки технологической системы при такой волновой ОУО поверхности детали могут быть использованы следующие зависимости:

$$f = \frac{n_o}{60} K_{HV}; A = 10^{-3} S_m (1 - K_{HV}); L = (1,5 - 2,0) A,$$

где  $f$  – частота колебательных движений деформирующего ролика, Гц;

$n_d$  – частота вращения обрабатываемой детали, об/мин.;

$K_{HV}$  – коэффициент, определяемый отношением твёрдости обрабатываемого материала детали к твёрдости материала деформирующего ролика;

$A$  – амплитуда пересекающихся волн на поверхности детали, мм;

$S_m$  – шаг волн на поверхности детали, мм;

$L$  – величина возвратно-поступательного перемещения упрочняющего ролика, мм.

Сравнение скорости вращения обрабатываемой детали  $V_d$  со скоростью вращения упрочняющего ролика  $V_p$  при обработке цилиндрических деталей, а также скорости продольного перемещения детали (инструмента)  $S_{np}$  со скоростью вращения упрочняющего ролика  $V_p$  показало, что их отношение меньше единицы, т.е.

$$\frac{V_p}{V_d} < 1 \text{ и } \frac{V_p}{S_{np}} < 1.$$

Это свидетельствует о том, что в зоне контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью имеет место процесс скольжения, приводящий, согласно исследованиям В.П. Кузнецова [11, 12], к наноструктурированию материала поверхностного слоя детали.

Разработаны способы волновой ОУО деталей колеблющимся роликом с модифицированием материала поверхностного слоя, среди которых перспективным является, например, создание такого слоя за счёт подачи в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью детали алюминиевой фольги шириной 5 мм и толщиной не более 0,05 мм с нанесёнными и закреплёнными на ней графитовым порошком и кристаллическим йодом.

С целью выявления эффективности разработанной технологии создания модифицированного слоя и исследования особенностей поведения йода в контактной зоне сопряжённых поверхностей деталей трибосистем ОУО колеблющимся роликом из закалённой быстрорежущей стали Р6М5 подвергались бесступенчатые валики из стали 12Х3Н диаметром 40 мм и

длиной 320 мм, прошедшие предварительное шлифование и имеющие начальную шероховатость поверхности  $R_a = 0,8\text{--}1,2$  мкм. Были приняты следующие режимы обкатки: сила давления ролика на обрабатываемую поверхность детали  $P = 1000$  Н, продольная подача  $S_{np} = 0,1$  мм/об; количество проходов  $m = 3$ ;  $n_d = 80$  об/мин;  $A = 0,025$  мм;  $L = 0,04$  мм;  $f = 2$  Гц; величина импульсного тока  $I = 2,5$  КА, которая обеспечила в зоне контакта роликов и обрабатываемой поверхности температуру нагрева в диапазоне 250 – 300°C. Такие режимы обработки способствовали созданию на поверхности детали трибосистемы достаточно плотного модифицированного слоя, толщиной 0,3 – 0,5 мм, имеющего твёрдость, равную 80–90% твёрдости основного материала детали и хорошую сцепляемость с ним ( $\tau_{cz} = 150\text{--}180$  МПа).

Работоспособность деталей трибосистем после ОУО с модифицированием материала поверхностного слоя оценивалась по интенсивности изнашивания поверхностного слоя. Исследования проводились на машинах трения, позволяющих создавать в зоне контакта деталей трибосистем давления  $p = 0,1\text{--}4,0$  МПа, скорости скольжения  $V_{ck} = 0,05\text{--}1,5$  м/с, температуру  $\Theta = 20\text{--}400$  °C в различных средах [14]. Было установлено, что создание при ОУО на поверхностях деталей трибосистем модифицированного железоуглеродистого наносложения позволяет существенно снизить коэффициент трения при повышенных температурах в зоне контакта взаимодействующих поверхностей (рис. 1).

Добавка кристаллического йода в закрепляемый на фольге графитовый порошок способствует не только снижению коэффициента трения в зоне контакта, но и создаёт в процессе трения на сопряжённой поверхности детали трибосистемы плёнку, выполняющую роль твёрдой смазки. Это было подтверждено спектрографическим анализом материала поверхностного слоя деталей контролл из сталей X18H9T и 12Х3Н, контактируемых с модифицированными поверхностями образцов из стали 45, на сканируемом электронном микроскопе «Quanta – 200». При этом толщина образующейся на сопряжённой поверхности детали йодной смазочной плёнки не превышает 0,1 мкм. В результате имеет трибоэкранирование поверхностных слоёв сопряжённых деталей [15].

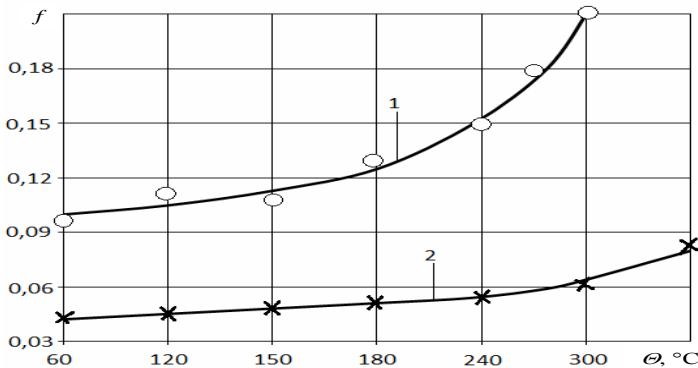


Рис. 1. Изменение коэффициента трения  $f$  от температуры в зоне контакта  $\Theta$  при обычном трении (кривая 1) и модифицированным слоем (кривая 2):  $p = 0,5 \text{ МПа}$ ,  $V_{ck} = 0,2 \text{ м/с}$

Исследованиями установлено, что оптимальное количество йода в модифицируемом материале поверхностного слоя детали определяется как его состоянием после предварительной обработки по параметрам шероховатости, структуры и величины технологических остаточных напряжений, режимов обкатки, так и условиями эксплуатации. Так, для принятых режимов ОУО, начальной шероховатости поверхности после шлифования и условий эксплуатации до температуры до  $\Theta = 250^\circ\text{C}$  рекомендуется добавлять в наносимый на алюминиевую фольгу графит 5 – 8% (по объёму) кристаллического йода. Если температура эксплуатации детали с модифицированным слоем превышает  $250^\circ\text{C}$ , то вместо кристаллического йода, который при такой температуре возгоняется, рекомендуется на фольге закреплять размельчённый дийодид хрома, который разлагается с выделением йода при температурах выше  $500^\circ\text{C}$ . При этом количество дийодида хрома, наносимого на поверхность алюминиевой фольги вместе с графитом, составляет 15 – 20% (по объёму) от графита.

Другой перспективной технологией создания функциональных слоёв с направленной модификацией материала поверхностного слоя деталей трибосистем может стать способ обработки цилиндрических деталей [13], включающий волновое поверхностное пластическое

деформирование вращающейся детали колеблющимся роликом с непрерывной подачей в зону поверхностного пластического деформирования смазочно-плакировочной жидкостной композиции, содержащей компоненты в следующих соотношениях (масс. %): измельчённый графит – 2,5 – 3,0; кристаллический йод – 0,05 – 0,08; минеральное масло – остальное. В качестве измельчённого графита рекомендуется использовать твёрдую графитовую смазку с размерами основной фракции не более 3 мкм.

В процессе волновой ОУО детали осуществляется нанесение на поверхность обрабатываемой детали регулярного микрорельефа с возможностью изменения его как по амплитуде, так и по шагу в процессе обработки, и создание на поверхности устойчивого железоуглеродистого нанослоя, обладающего низким коэффициентом трения в диапазоне температур эксплуатации трибосистемы от 20° С до 800° С. При этом толщина образующегося наноструктурного железоуглеродистого слоя составляет 60-80 нм, а созданный на поверхности детали регулярный микрорельеф в процессе эксплуатации выполняет функцию «масляных карманов» для образовавшихся кластерных наноструктур.

Оценка эффективности смазочно-плакировочной жидкостной композиции и созданного с её помощью железоуглеродистого нанослоя осуществлялось по величине интенсивности изнашивания поверхностного слоя образцов из разных конструкционных материалов и при различных условиях эксплуатации. Предварительно исследуемые образцы подвергались шлифованию и имели шероховатость  $Ra = 0,80 - 1,25$  мкм. В качестве контртела использовались бруски из быстрорежущей стали Р6М5, закалённые до твёрдости HRC 62...65 и шероховатостью поверхности не выше  $Ra = 0,80$  мкм. Результаты выполненных исследований (табл. 1) показали, что создание на поверхностях деталей трибо- систем железоуглеродистого нанослоя позволяет в 2 – 4 раза повысить износостойкость их рабочих поверхностей (рис. 2).

Таблица 1

Средняя интенсивность изнашивания образцов *I* из разных материалов в зависимости от состояния их поверхностей

Обрабатываемый материал	Условия эксплуатации			Интенсивность изнашивания, $I \times 10^{-4}$ , г/ч	
	$p$ , МПа	$V_{ck}$ , м/с	$\theta^{\circ}\text{C}$	без железоуглеродной иодидистого нано слоя	с железоуглеродной иодидистым нано слоем
12Х2Н4А	0,5	0,2	100	20,6	9,8
20ХН2МА	0,5	0,2	100	19,5	9,3
20ХН2МА	0,5	0,5	200	28,1	13,2
30ХГСА	1,0	0,5	200	32,6	14,5
30ХГСА	1,5	1,0	200	44,8	17,4
45Х25Н20С2	1,0	1,0	300	36,5	14,8
45Х25Н20С2	1,5	1,0	300	39,2	15,3
ХН70ВМТЮ	1,5	1,0	500	48,4	13,7
ХН70ВМТЮ	1,5	1,0	800	72,9	17,6
ХН77ТЮР-ВД	1,5	1,0	800	65,3	14,9

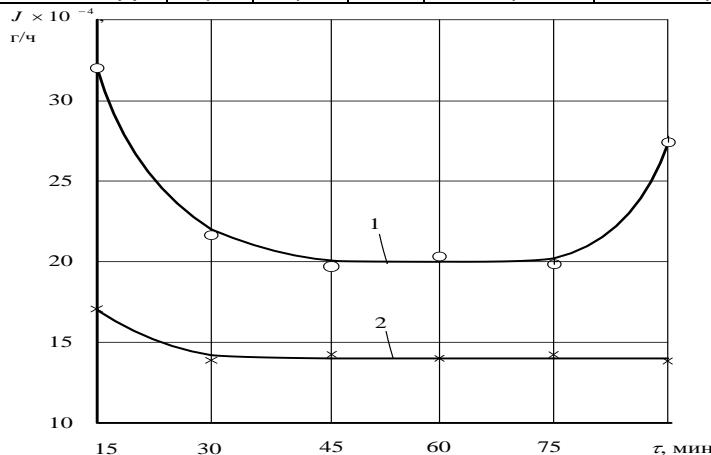


Рис. 2. Изменение интенсивности изнашивания *I* поверхностей пары трения «сталь 20ХН2МА – сталь 20ХН2МА» от времени эксплуатации *t*.

1 – без железоуглеродийодистого нанослоя; 2 – с  
железоуглеродийодистым  
нанослоем ( $\rho = 0,8$  МПа;  $V_{cr} = 0,5$  м/с;  $\Theta = 200^\circ\text{C}$ )

Представленные технологии волновой ОУО деталей колеблющимся роликом с модификацией материала поверхностного слоя могут существенно повысить работоспособность деталей трибосистем при сравнительно небольших дополнительных экономических затратах. Создание таких модифицированных железоуглеродийодистых слоёв особенно эффективно для деталей трибосистем газотурбинных, авиационных и судовых двигателей. Выбор той или иной технологии волновой ОУО деталей и обусловлен конкретными условиями эксплуатации трибосистемы.

- 
1. Ганиев Р.Ф. Волновые технологии и машины – фундаментальная основа инновационного развития машиностроения / Научные труды II Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: ИМАШ РАН, 2012. – С. 11 – 18.
  2. Бутенко В.И. Упрочнение поверхностного слоя детали колеблющимся роликом / В кн.: Вопросы вибрационной технологии. Межвуз. сб. научн. ст. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2011. – С. 26 – 29.
  3. Инструмент для упрочняющей обработки. Патент РФ №2173628. МКИ B24B 39/00. / Бутенко В.И., Диденко Д.И. – Опубл. 20.09.2001г. Бюл. №26.
  4. Устройство для упрочняюще-чистового обкатывания деталей. Патент РФ №2184024. МКИ B24B 39/00. / Бутенко В.И., Диденко Д.И. – Опубл. 27.06.2002г. Бюл. №18.
  5. Устройство для упрочняюще-чистового обкатывания деталей. Патент РФ №2201323. МКИ B24B 39/00. / Бутенко В.И., Диденко Д.И. – Опубл. 27.03.2003г. Бюл. №9.
  6. Способ обработки цилиндрических деталей. Патент РФ №2221686. МКИ B24B 39/00, 39/04. / Бутенко В.И., Диденко Д.И. – Опубл. 20.01.2004. Бюл. №2.
  7. Устройство для упрочняющего обкатывания деталей. Патент РФ №2234405. МКИ B24B 39/00./ Бутенко В.И., Диденко Д.И. – Опубл. 20.08.2004г. Бюл. №23.
  8. Устройство для поверхностно-упрочняющего обкатывания деталей. Патент РФ №2279965. МКИ B24B 39/00. / Бутенко В.И., Диденко Д.И. – Опубл. 20.07.2006г. Бюл. №20.
  9. Способ обработки цилиндрических деталей. Патент РФ №2412042. МКИ B24B 39/00, C10M 141/10. / Бутенко В.И. – Опубл. 20.02.2011г. Бюл. №5.
  10. Устройство для поверхностно-упрочняющего обкатывания деталей. Патент РФ на полезную модель №102560. МКИ B24B 39/00. / Бутенко В.И., Корсаков М.Н., Бабикова А.В. – Опубл. 10.03.2011г. Бюл. №7.

11. Кузнецов В.П., Никонов А.Ю., Дмитриев А.И., Псахье С.Г., Макаров А.В. Исследование механизмов наноструктурирования поверхностного слоя при пластическом деформировании скользящим индентором. Моделирование на атомном уровне. // Физическая мезомеханика. – 2012.- Т. 15. – №3. – С. 59 – 69.
12. Кузнецов В.П. Теоретическое обоснование и реализация наноструктурирующего выглаживания при обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей / Автореф. дисс. на соискание уч. степени д-ра технич. наук. – Томск, 2013. – 34 с.
13. Способ поверхности пластического деформирования цилиндрических деталей. Патент РФ №2500517. МКИ B24B 39/04. / Бутенко В.И., Кулинский А.Д. – Опубл. 10.12.2013г. Бюл. №34.
14. Бутенко В.И. Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.
15. Бутенко В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.

**УДК621.757**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ С ВИБРАЦИЯМИ**

*Божкова Л.В., Вартанов М.В., Мартынович Н.А.  
УМ, г.Москва, Россия*

Экспериментальный комплекс, общий вид которой представлен на рисунке 1 состоит из двух основных частей: экспериментальной установки и системы контрольно-измерительной аппаратуры, подключенной к компьютеру. Между адаптивным захватывающим устройством 2 и торцом выходного звена промышленного робота расположен высокоточный датчик контроля усилий и моментов 5. При этом схват относительно робота имеет две степени свободы – вращение в горизонтальной плоскости и поступательное перемещение по вертикали. Также на специальном постаменте установлено вибрационное устройство 1, рассмотренного в работах [1] и [2], которое в центре ориентирующего диска выходного звена имеет жестко закрепленную собираемую втулку 7 [3].

Вибрационное устройство представляет собой двухзвеный манипулятор. Каждое звено имеет одну степень свободы – вращение. Оси вращения звеньев расположены в одной плоскости и взаимно перпендикулярны. Звенья приводятся в движение четырьмя электромагнитами (по два на каждое звено) за счет их взаимодействия с постоянными магнитами, установленными на звеньях. Напряжение на

приводные электромагниты подается от генератора низкочастотных гармонических сигналов 8. Оба звена имеют пружинные демпферы, которые предотвращают удары в крайних положениях.

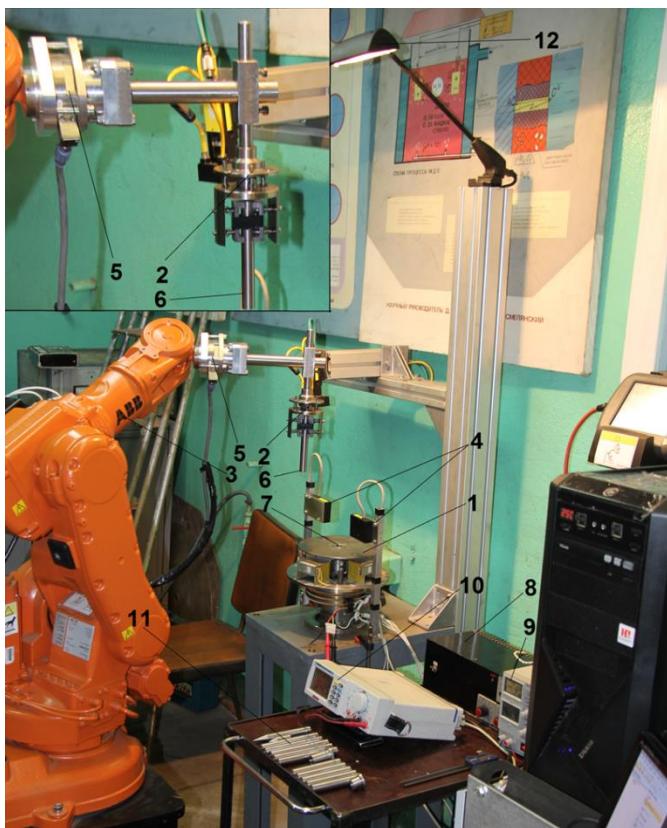


Рисунок 1. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки с вибрациями:

- 1 – вибрационная опора; 2 – адаптивный хват; 3 – промышленный робот; 4 – лазерный триангуляционный датчик; 5 – силомоментный датчик; 6 – присоединяемая деталь (вал); 7 – базовая деталь (втулка); 8 – генератор гармонических сигналов; 9 – источник питания лазерных триангуляционных датчиков; 10 – электронный частотомер; 11 – экспериментальные образцы; 12 – дополнительное освещение.

Адаптивный схват (рисунок 2) изготовлен в соответствии с кинематической схемой метода, которая предполагает возможность упругих перемещений собираемого вала в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Схват состоит из корпуса 1, установленного на штанге 2 и соединенного по направляющим шпилькам 6 через пружины 7 с опорной тарелкой 3, имеющей упорную шайбу 8. В корпусе 1 располагаются зажимные губки 4, выполненные в виде призм и соединенные с корпусом по шпилькам 5 через пружины 7. Расчет пружин проводится, исходя из величин требуемой жесткости и конструктивных особенностей схвата.

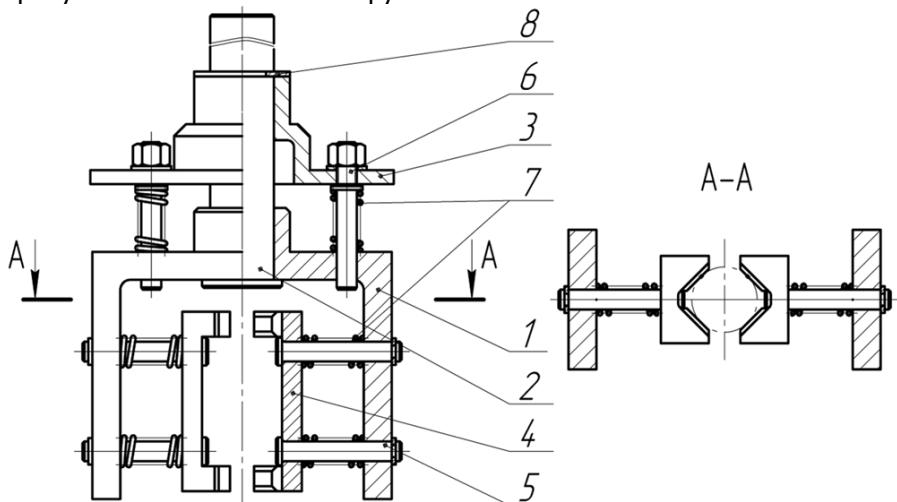


Рисунок 2. Адаптивный схват.

Конструктивные и функциональные особенности экспериментальной установки позволяют варьировать следующие параметры:

- частота колебаний виброопоры – в диапазоне 1...30 Гц с шагом 0,5 Гц;
- линейная амплитуда колебаний выходного звена виброопоры – в диапазоне 0,4...3 мм с шагом 0,1 мм;
- величина линейного рассогласования положения осей собираемых деталей – в диапазоне 0...2 мм с шагом 0,05 мм;

- зазор в соединении (см. таблицу 1);
- жесткость пружин схвата: 0,125 Н/мм, 0,333 Н/мм, 0,5 Н/мм.

С целью подтверждения возможности использования предлагаемого метода сборки для цилиндрических бесфасочных соединений с малыми зазорами были изготовлены детали по 7-му квалитету с соответствующими посадками и геометрией (таблица 1).

Таблица 1.  
Номинальные и фактические размеры вала и втулки.

№ вала	$d$ , мм	$d_{факт}$ , мм	$D$ , мм	$D_{факт}$ , мм	зазор в соединении
1	$16 js7$	16,00	$16 H7$	16,01	0,01
2	$16 h7$	15,98			0,03
3	$16 f7$	15,97			0,04
4	$16 e7$	15,96			0,05
5	$16 d7$	15,94			0,07

---

1. Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И. Вопросы вибрационной технологии// Межвузовский сборник научных статей «Вопросы вибрационной технологии», 2006, Ростов-на-Дону, с.62-67.

2. Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И Экспериментальная установка для роботизированной сборки// «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2009, №1 с.5-7.

3. Патент на изобретение «Способ сборки соединений типа «вал-втулка». Вартанов, Божкова, Кольчугин. № 2381095. Опубл. 10.02.2010 Бюлл. №4

**УДК 504.064.45/629.33(075.8)**

## **РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ**

*Попов М.Е., Попов А.М., Попова С.О.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия*

Большинство современных технологий в процессе производства продукции сопровождаются значительными потерями и большим количеством отходов. К потерям следует отнести и неэффективное использование отработавшей техники и предметов потребления (рис. 1). В настоящее время объемы

накопленных отходов начинают превышать восстановительный потенциал природы, что ведет к ухудшению экологии среды обитания и возникновению техногенных экологических катастроф. Поэтому в ряде промышленно развитых стран в отношении отходов производства принят лозунг RRR (reduce – reuse – recycling), то есть «снижение – вторичное использование – переработка». Эта концепция получила дальнейшее развитие в методологии «бережливое производство» (рис. 2). На самом деле бережливое производство работает не с сокращением расходов, что могло бы привести к снижению качества продукции, а с сокращением потерь.

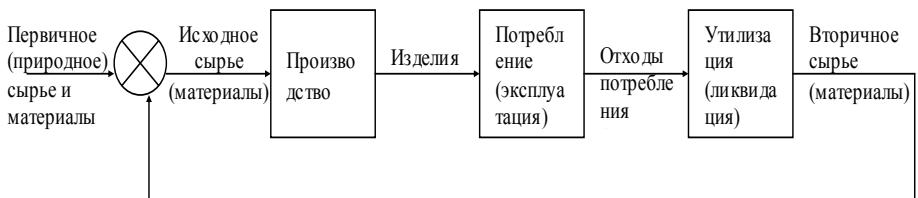


Рис. 1. Жизненный цикл (кругооборот) конструкционных материалов



Рис. 2. Стrатегическое структурирование четырех ключевых моментов бережливого производства [1]

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды - негативного и кумулятивного воздействия на человека и

биоту - следует рассматривать отходы производства и потребления. С другой стороны, отходы являются, прежде всего, источником вторичных материальных и энергетических ресурсов. Масштабы образования отходов позволяют говорить сегодня о «второй геологии» - науке об антропогенных ресурсосберегающих отходах.

В настоящее время при решении задач, связанных с обращением с отходами, необходимо учитывать ряд факторов:

- отходы образуются в сфере производства, обращения и потребления, при этом в сфере производства, прежде всего, - в результате несовершенства базовых технологических процессов;
- несмотря на то, что отдельные виды отходов используются почти на 100%, средний уровень использования твердых отходов в России довольно низок и составляет примерно 25-30%;
- значительная часть отходов не находит хозяйственного применения не только потому, что слабо развита научно-техническая и производственная база их переработки, но и вследствие избыточности объемов их образования;
- высокий уровень переработки отдельных видов отходов еще не означает, что задача их использования решена или близка к завершению. Необходимо учитывать также экономический эффект от принятого способа их хозяйственного применения, причем с учетом экологических и социальных факторов;
- отходы представляют собой ценное сырье, сопоставимое по концентрации содержащихся в них полезных компонентов с первичным сырьем и материалами, а в ряде случаев - даже превосходящее их;
- складирование, захоронение или уничтожение отходов (например, сжигание) по экономическим соображениям требуют значительных капитальных, а также эксплуатационных затрат и др.

Сложность и многообразие задач защиты окружающей среды от воздействия отходов производства и потребления требует создания в Российской Федерации многоуровневой системы управления отходами, основанной на сочетании административно-правовых, нормативных и экономических методов (рис. 3).



Рис. 3. Модель федерального управления ресурсосбережением [2,3]

Актуальность рассматриваемой темы подтверждается также тем, что в соответствии с «Основами политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу» направление исследований «Природоохранные технологии, переработка и утилизация техногенных образований и отходов» включено в перечень критических технологий федерального уровня (утверждены Президентом РФ 30 марта 2002 г. № Пр-576, № Пр-578).

В решении проблем экологии магистральными направлениями являются широкое внедрение ресурсосберегающих технологий [4] и реновация средств и объектов материального производства [5].

Ресурсосберегающая технология – технология, обеспечивающая получение готовой продукции с меньшими затратами природных ресурсов, энергии, других видов ресурсов, чем прежде. Она предусматривает проведение единой технологической политики и проектирование производственных мощностей с высокими показателями эффективности капиталовложений, производительности труда и качества

выпускаемой продукции. Основное внимание уделяется малоотходным и безотходным технологиям, внедрению замкнутых автоматизированных технологических процессов, использованию промышленных роботов, повышению степени механизации и автоматизации труда, использованию вторичных материальных и энергоресурсов, прогрессивных конструктивных решений.

Техническое переоснащение любого производства является в настоящее время остройшей проблемой, из-за недостатка оборотных средств и инвестиций, ограниченности многих видов материальных ресурсов. В этой связи большая роль сегодня отводится разумной эксплуатации имеющихся машин и оборудования, своевременному восстановлению работоспособности, модернизации, при необходимости утилизации и вторичному использованию различных агрегатов или отдельных их частей.

В большой степени поставленные проблемы могут быть решены, если придать необходимое значение вопросам реновации средств и объектов материального производства [6].

Реновация – это комплекс технологических, конструкторских и организационных мероприятий, направленных на восстановление или продление рабочего ресурса объектов материального производства, а также на использование их по новому назначению с минимальными затратами энергии и материалов, либо на утилизацию их с минимальной экологической вредностью (рис. 4).

Реновацией можно сэкономить не только материальные ресурсы, уменьшить огромные затраты на добычу и переработку сырья для выплавки металла, производства других видов материалов, заготовок, механическую обработку, но и снизить вредное воздействие на окружающую среду.

Число технологических процессов, которые могут быть названы реновационными, достаточно велико [7]. Для правильного выбора технологии реновации и ее параметров необходимо иметь представление о характере дефектов, износа, вызывающих выход детали из строя, о причинах, приводящих к такому результату, о явлениях, происходящих в самой детали, как в процессе эксплуатации, так и на более ранних стадиях ее существования, в том числе и на стадии изготовления.

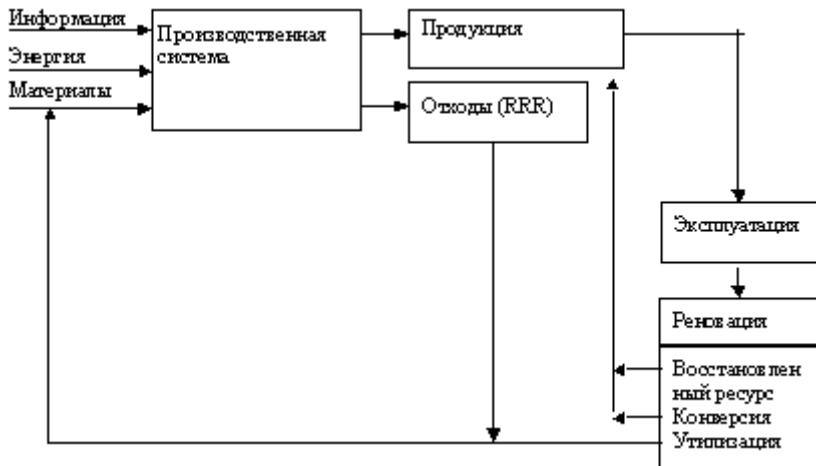


Рис. 4. Реновация материальных объектов

В последние годы исследования в области конструкционных материалов и методика конструирования развиваются в направлениях, обеспечивающих минимизацию отходов производства и возможность вторичного использования элементов изделия по истечении срока его эксплуатации.

Вторичное использование (Recycling) – это повторное применение изделия или его элементов в замкнутом цикле. Можно выделить вторичное использование изделия (его деталей и узлов) после окончания срока эксплуатации и повторное применение материалов как утильсырья после соответствующей переработки и обогащения (рис. 5).

Существуют две дополняющие друг друга стратегии реализации цели вторичного использования изделий:

- 1) разработка технологии обогащения утильсырья и модернизация изделия, способствующая его эффективной утилизации;
- 2) конструирование изделия с учетом его вторичного использования.

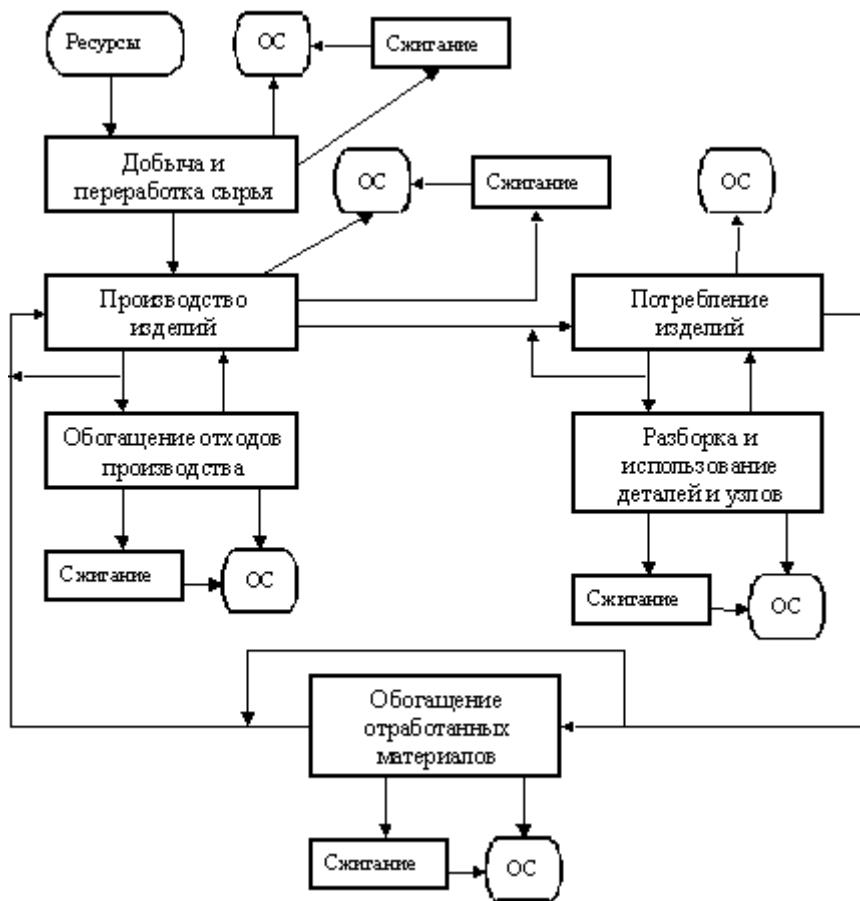


Рис. 5. Возможность вторичного использования изделий и материалов (ОС – окружающая среда)

При конструировании изделия наряду с различными требованиями, определяющими его качество, необходимо учитывать и требования, обусловленные вторичным использованием изделия [8]. Можно выделить два основных требования.

Во-первых, независимо от выбранной стратегии вторичного использования необходимо обеспечить благоприятный для демонтажа способ соединения деталей.

Во-вторых, разрабатывая конструкцию изделия, следует учитывать совместимость материалов при их использовании и утилизации (рис. 6).



Рис. 6. Структура автоматизированного банка данных по промышленным отходам и технологиям их переработки

Следует отметить, что вторичное использование эффективно лишь в тех случаях, когда себестоимость изделия, полученного из вторичного сырья, оказывается ниже аналогичного изделия, изготовленного из традиционных материалов. Например, выбранный способ обогащения материала не должен быть более энергоемким, чем производство нового материала, а конструкторское решение не должно снижать качество получаемого изделия и возможностей

его совершенствования. С этой точки зрения необходимо учитывать затраты всего жизненного цикла изделия [8].

Решение о величине будущих затрат необходимо принимать как можно на более ранних стадиях проектирования, когда затраты на внесение изменений в изделие будут наименьшими. Так как в этом случае мы сталкиваемся с ситуацией ограниченной информации о новом создаваемом изделии, то необходимы простые и надежные методы оценки затрат всего жизненного цикла изделия. Эти методы должны давать возможность быстрой оценки и принятия правильных решений о стоимости и ожидаемых затратах еще до точной их калькуляции и определения цены изделия, обычно делающихся перед запуском продукции в производство.

- 
1. Вумек Дж., Джонс Д.Ю., Рус Д. Машина, которая изменила мир. Пер. с англ. — Минск.: Попурри, 2007.
  2. Бунин Г.П. , Плотников А.В., Плущевский М.Б. Стандартизация и стандартософия на службе цивилизации (Прошлое, настоящее, будущее). — М.: Изд-во НТК «Трек», 2011.
  3. Бунин Г.П., Плущевский М.Б., Плотников А.В. Военная стандартизация в России / Аналитический обзор к 85-летию создания военной стандартизации. — М.: Изд-во Академии стандартизации, метрологии и сертификации, 2012. — С. 90.
  4. Попов М. Е., Попов А. М. Ресурсосберегающие технологии и проблемы экологии//Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 1997 г.
  5. Попов М. Е., Чудин Р. Х., Шацкий Я. Л. Переработка и повторное использование отходов и лома РЭА и ЭВМ//Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 1997 г.
  6. Реновация материальных объектов как перспективное направление научно-технического прогресса/Гаврилюк В. С., Колесников А. Г., Ляпунов Н. И. И др./Вестник машиностроения, 1998 г., № 11, с. 20-23.
  7. Попов М. Е., Стаханова Т. М., Чудин Р. Х. Региональный банк данных по отходам и технологиям их переработки//Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 1997 г.
  8. Байтц В. Конструирование изделий и проблема их вторичного использования//СТИН, 1998 г., № 4, с. 38-41.

**УДК 532.59; 532.595**

**ВИБРАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНТЕНСИВНО  
ВИБРИРУЮЩИХ МНОГО МАССНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ  
СРЕДАХ**

*Копылов Ю.Р., Мышьяков А.И.*

ВГТУ, Космос нефте-газ, Воронеж, Россия

Исследуется посредством высокоскоростного компьютерного моделирования вибрационно-волновые перемещения стальных закаленных шариков диаметром 0,5 см из стали ШХ-15 в интенсивно вибрирующем контейнере цилиндрической формы диаметром 34,0 см длиной 12,0 см. В торце контейнера устанавливается прозрачная стенка, для наблюдения перемещений частиц инструментальной среды. В центре контейнера устанавливается макет детали диаметром 14,0 см, шириной 10,7 см. Исследования выполняются без технологической жидкости. Контейнер и макет детали изготовлены из стали Ст. 3, имеют шероховатость  $Rz$  20-25 мкм. Расстояние между поверхностями контейнера и макетом детали составляет 10,0 см, толщина инструментальной среды между ними составляет слоя 40 слоёв. Амплитуда колебаний 0,2-0,8 см, частота вынужденных колебаний  $v = 21 \text{ Гц}$  ( $\omega = 131,88 \text{ с}^{-1}$ ). Пространство между контейнером и макетом детали заполняется на 78 % инструментальной средой.

В связи с трудностью экспериментального наблюдения волновых процессов в вибрирующей инструментальной среде и выполнения скоростной видеосъёмки, предпринята попытка исследования вибрационно-волновых процессов методом высокоскоростного компьютерного моделирования. Идея метода состоит в том, чтобы на цветовом изображении колебаний стальных закаленных шариков, обнаружить волновые перемещения слоёв инструментальной среды.

На рис. 1 представлена трех мерная модель технологической системы упрочняемая деталь – инструментальная среда – контейнер (рис. 1, а) и статическая картина в диметрической проекции с разрезом по вертикальной оси цветовое изображение скоростей перемещений слоёв

вибрирующей инструментальной среды (рис. 1, б). Видны волнообразные перемещения слоёв, отмеченные различным цветом. По результатам компьютерного моделирования, в соответствии с цветовой шкалой, амплитуды скорости перемещений слоёв шариков инструментальной среды составляют 10 до 120 см/с.

На динамическом цветовом видео показе изображения перемещений слоёв шариков интенсивно вибрирующей инструментальной среды, которое демонстрируется в режиме «Player», хорошо видны волновые перемещения. Они выделены чередующимися повышенным (100-120 см/с) и пониженными (5-10 см/с) скоростями резонансных волновых перемещений и имеют характер углового перемещения со смещением центра вращения по траектории колебаний. Частота углового волнового перемещения и перемещения центра вращения равна частоте вынужденных колебаний технологической системы.

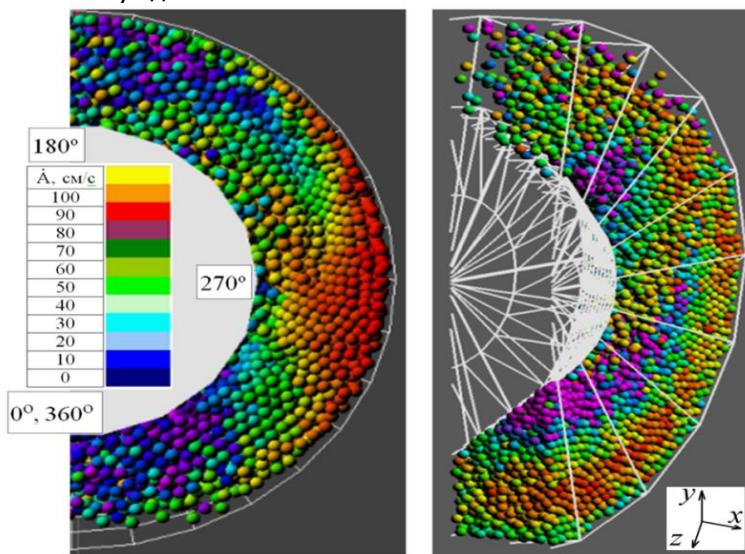


Рис. 1. Трех мерная модель технологической системы, упрочняемая деталь – инструментальная среда – контейнер:  
 а) – вид с торца; б) – диметрическая проекция  
 с разрезом по вертикальной оси

Другим фактором, свидетельствующим о волновых перемещениях, является закономерность изменения относительной скорости перемещений шариков среды (рис. 2).

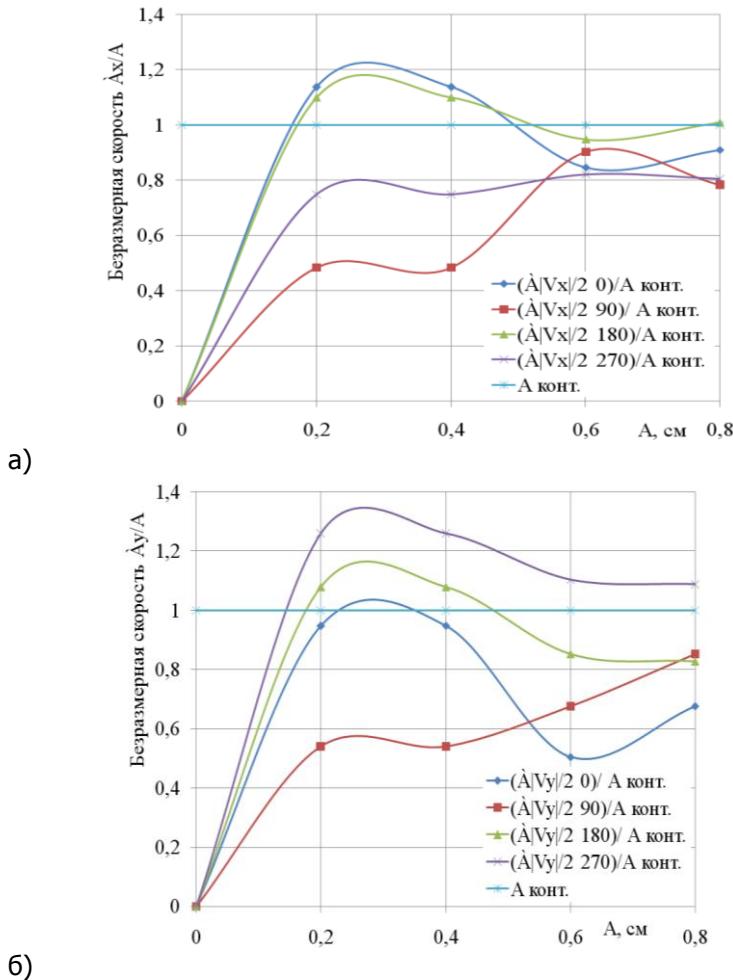


Рис. 2. Зависимость амплитуды горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющей относительной скорости перемещений шариков в 20-м слое инструментальной среды

в нижней части контейнера при  $\phi = 0^\circ; 360^\circ$

За счет волновых резонансных явлений горизонтальная и вертикальная составляющие амплитуды скорости перемещений шариков в вибрирующей инструментальной среды превышают амплитуду скорости колебаний контейнера, соответственно, до 23-25 и 35-40 %, не по всей площади, а в некоторых ее зонах.

Например, при  $\varphi = 90^\circ$  амплитуды скорости перемещений шариков меньше скорости колебаний контейнера, особенно при малых амплитудах (рис. 2).

Наблюдается значительное изменение скорости перемещений шариков в различных слоях инструментальной среды (рис. 3). В 15-м слое, отсчет ведётся от поверхности контейнера, амплитуда скорости перемещений, на этапе движения стальных шариков вправо и вверх в 2,5-3,2 раза больше чем в 23-м слое, расположенной почти на равном расстоянии от контейнера и детали. На этапе движения шариков вниз и влево – в 2,1-2,5 раза больше чем в 23-м слое.

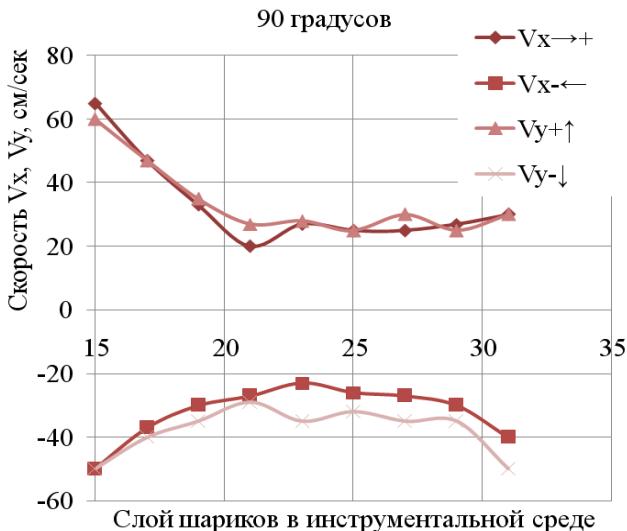


Рис. 3. Зависимость амплитуды скорости перемещений шариков от номера слоя вибрирующей инструментальной среды

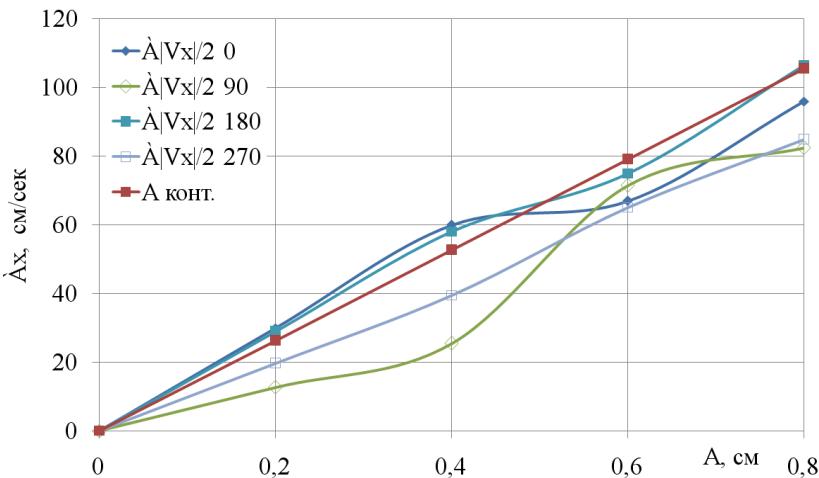


Рис. 4. Зависимость горизонтальной составляющей амплитуды  $\dot{A}_x$  (см/сек) скорости вибрационно-волновых перемещений группы частиц в 15-м слое выбирирующей инструментальной среды в различных зонах контейнера

С увеличением амплитуды колебаний контейнера, в диапазоне 0,2–0,8 см и частоте  $\omega = 131,88 \text{ с}^{-1}$ , амплитуда скорости колебаний растет в диапазоне 26,38–105,5 см/с. Амплитуда скорости колебаний стальных шариков устойчиво растет по нелинейной сложной зависимости с увеличением амплитуды скорости колебаний контейнера (рис. 4, 5) с различной интенсивностью. Наиболее интенсивный рост вертикальной составляющей амплитуды скорости колебаний шариков имеет место в правой боковой части контейнера (рис. 5), она устойчиво больше амплитуды скорости колебаний контейнера и детали. А горизонтальная составляющая амплитуды скорости колебаний шариков здесь устойчиво меньше амплитуды скорости колебаний контейнера и детали (рис. 4). Наибольшее уменьшения амплитуды скорости колебаний шариков при увеличении скорости колебаний контейнера и детали свыше 45–50 см/с наблюдается в левой боковой части

контейнера. Направление циркуляции вибрирующей инструментальной среды – против хода часовой стрелки.

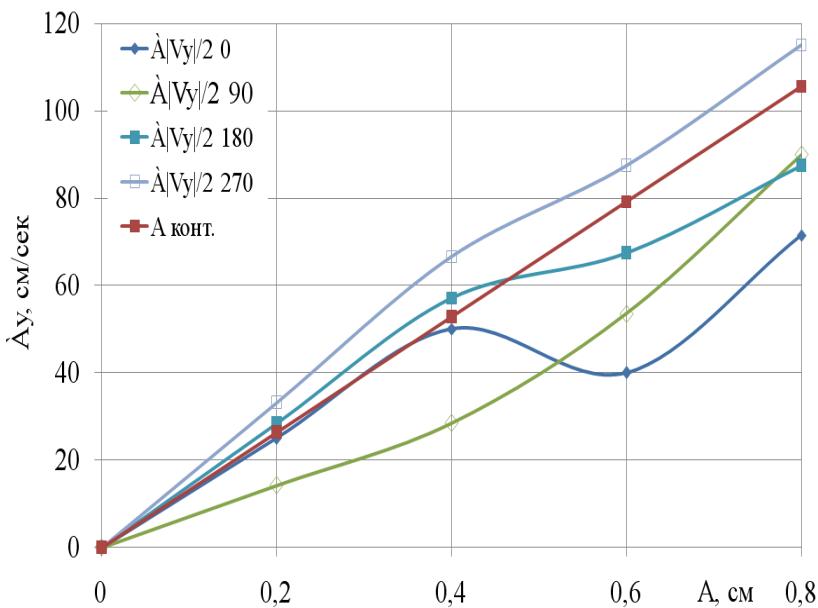


Рис. 5. Зависимость вертикальной составляющей амплитуды  $\dot{A}_y$  (см/сек) скорости вибрационно-волновых перемещений группы частиц в 15-м слое вибрирующей инструментальной среды в различных зонах контейнера

Вопрос о полезном использовании вибрационно-волновых резонансных процессов при виброударном упрочнении в настоящее время остаётся открытым и требует специальных исследований, но очевидно, что его можно использовать для увеличения производительности и повышения качества поверхностного слоя при виброударном упрочнении.

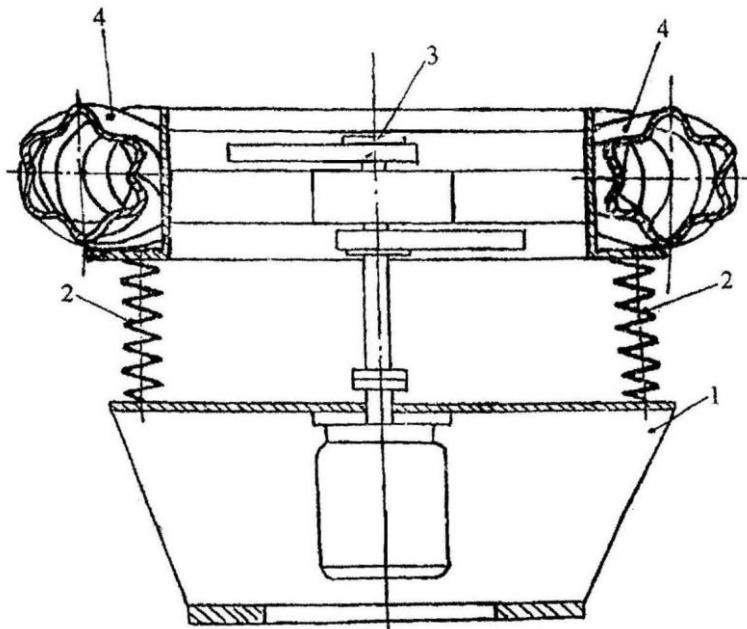
- 
- Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Научная монография. – Воронеж: Научная книга; 2011. – 569 с.
  - Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Челинейская волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Издательство «ИКИ». – 2011 г. 780 с.

**УДК 621.9.048.6.04**

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ВИБРОУСТАНОВОК С  
ТОРОИДАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРОЙ**

*Серга Г.В., Иванов А.Н.  
Кубанский ГАУ, г. Краснодар, Россия*

Интенсификация отделочно-зачистной обработки путем совершенствования геометрических форм рабочей камеры, как показывает опыт, позволяет обеспечить непрерывность технологического процесса. На рисунке 1 представлена конструкция виброустановки с тороидальной рабочей камерой [1]



**Рисунок 1- Виброустановка с тороидальной рабочей камерой.**

Виброустановка с тороидальной рабочей камерой (рисунок 1) состоит из станины 1, на которой с помощью пружин 2 упруго

закреплена и снабжена вибратором 3 тороидальная рабочая камера 4. Загрузочные и разгрузочные приспособления на чертежах не показаны.

Тороидальная рабочая камера 4 (рисунок 2, рисунок 3) выполнена в виде тора из секций 5 (рисунок 4) с волнообразной многозаходной винтовой поверхностью двоякой кривизны, снабженной винтовыми канавками внутри и снаружи рабочей камеры 4 под углом к его оси в виде карманов криволинейной формы с центрами кривизны, расположенными снаружи 6, 7, 8, 9, 10, 11 (рисунок 5) и карманов криволинейной формы с центрами кривизны, расположенными внутри поперечного сечения тороидальной рабочей камеры 12, 13, 14, 15, 16, 17.

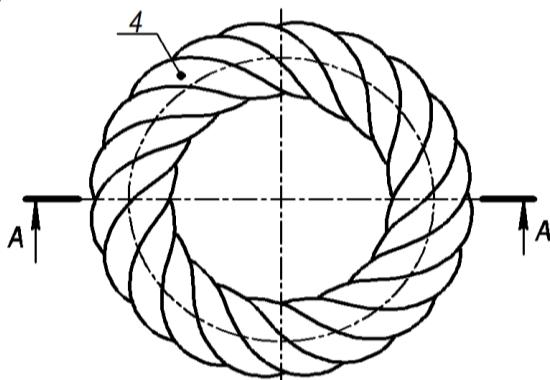


Рисунок 2- Тороидальная рабочая камера

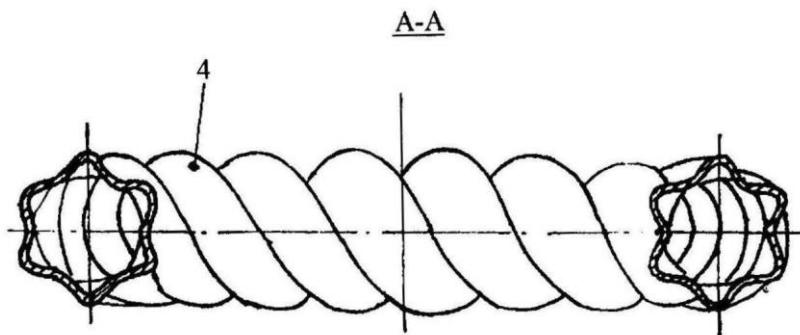


Рисунок 3- Разрез А-А на рисунке 2

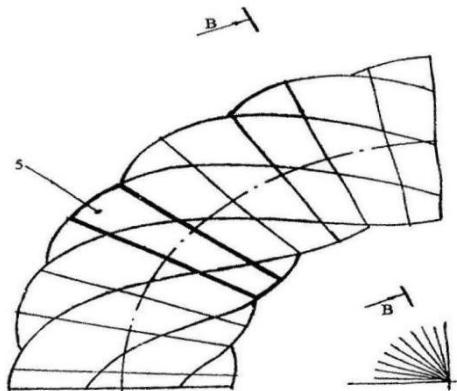
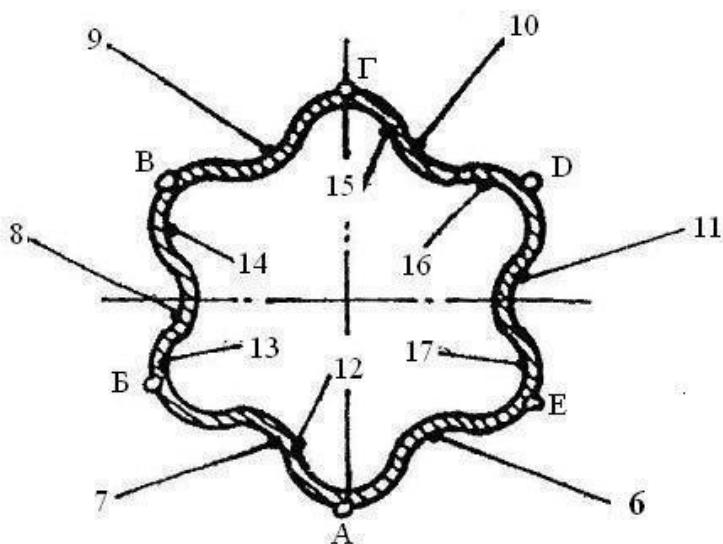


Рисунок 4 – Секция рабочей камеры

B-B



### Рисунок 5- Разрез Б-Б на рисунке 3

Одна из секций 5 (на рисунке 4 выделена сплошными утолщенными линиями) выполнена в виде кругого сектора и соединены между собой известными методами, например сваркой, клейкой и т.п., с образованием по наружному и внутреннему периметрам тороидальной рабочей камеры 4 винтовых канавок внутри и снаружи рабочей камеры 4 под углом к оси в виде карманов криволинейной формы с центрами кривизны, расположенными снаружи и внутри поперечного сечения рабочей камеры 4.

Карманы криволинейной формы по наружной поверхности 6, 7, 8, 9, 10, 11 (рисунок 5) и карманы криволинейной формы по внутренней поверхности 12, 13, 14, 15, 16, 17 по периметру рабочей камеры 4 могут быть различными не только по форме, но и по размерам.

Каждая из секций 5 изготовлена из полосы 18 (рисунок 6) согнутой волнообразно по линиям сгиба 19, расположенными под одинаковыми углами а к продольным кромкам полосы 18 и размещенными на одинаковых расстояниях L между линиями сгиба 19. Расстояние L равно сумме длин периметров геометрических фигур карманов внутренней и наружной поверхностей, а именно расстоянию между точками А-Б, Б-В, В-Г, Г-Д, Д-Е, Е-А.

Таким образом, каждая из секций 5 изготовлена в виде кругового сектора (рисунок 4) и смонтирована из полосы 18 (рисунок 6, 7), на которой размечены прямоугольники 20 (один из прямоугольников показан на рисунке 6 двойной линией) и линии сгиба 19, размещенные друг от друга на одинаковых расстояниях, равные длине развертки периметра криволинейных карманов на расстояниях L и под углом а к продольным кромкам полосы 18.

На полосе 18 размечены также линии обрезки 21 кромок полосы 18, показанные на рисунке 6 штрих-пунктирной линией с двумя точками. Кромки полос по линии обрезки отрезаются, и полоса 18 приобретает вид, показанный на рисунке 7 , у которой линии сгиба 19 полосы 18 разные по длине L1 L2 L3 L4 L5 L6 с образованием, при этом, разных по размерам четырехугольников с двумя паралельными сторонами–линиям

сгиба 19, параллельным друг другу.

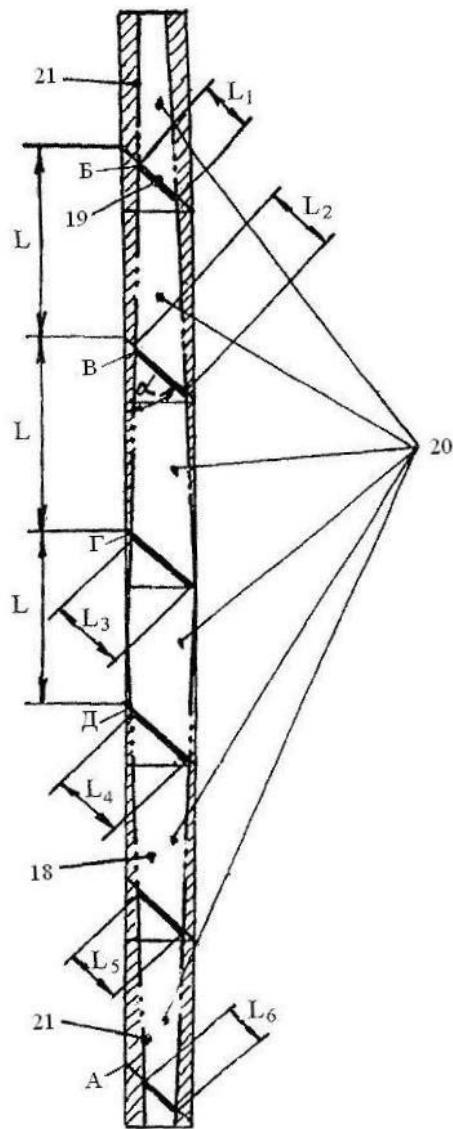


Рисунок 6- Полоса с размеченными линиями обрезки сгиба

Полосу 18 (рисунок 7) после обрезки кромок прямоугольников 20 по линии обрезки 21гибают волнообразно по прямым линиям, размещенным под углом α к кромкам полосы 18 с образованием волнообразных поверхностей А-Б, Б-В, В-Г, Г-Д, Д-Е, Е-А, и затем сворачивается в кольцо 22 (рисунок 8) с криволинейной волнообразной поверхностью. Волнообразная полоса 18 после сворачивания в кольцо 22 соединяются известными методами, например сваркой, пайкой и т.д., по перечным кромкам 23 и 24 (рисунок 7, 8) полосы 18 с образованием секции 5 в виде кругового сектора.

Таким образом, тороидальная рабочая камера 4 (рисунки 2 и 3) изготовленная в виде тора, выполнена по периметру в виде многозаходной волнообразной винтовой поверхности криволинейной формы под углом к оси тороидальной рабочей камеры.

Тороидальная рабочая камера 4 (рисунки 2 и 3) в виде тора (кругового кольца) с волнообразной криволинейной винтовой поверхностью по его внутреннему и наружному периметрам с образованием карманов криволинейной формы с изменяющимся по диаметру рабочей камеры шагом может быть изготовлена и иным способом.

Виброустановка с тороидальной рабочей камерой работает следующим образом.

В тороидальную рабочую камеру 4 через средство для загрузки беспрерывно загружаются частицы рабочих сред и обрабатываемые детали. Возмущающая сила вибратора 3 через стенки тороидальной рабочей камеры 4 передается частицам рабочих сред и обрабатываемым деталям, находящимся внутри рабочей камеры и они под воздействием вибрации совершают вращательное движение в плоскости, перпендикулярной проходному сечению рабочей камеры 4.

Так как на пути движения частиц рабочих сред и обрабатываемых деталей при этом вращательном движении под разными углами расположены винтовые волнообразные поверхности, то частицы рабочих сред и обрабатываемых деталей вынуждены изменять направления своего движения и совершать сложное

движение, при котором они не только перемещаются от загрузки и выгрузке, но и обеспечивается их взаимодействие друг с другом и со стенками рабочей камеры 4.

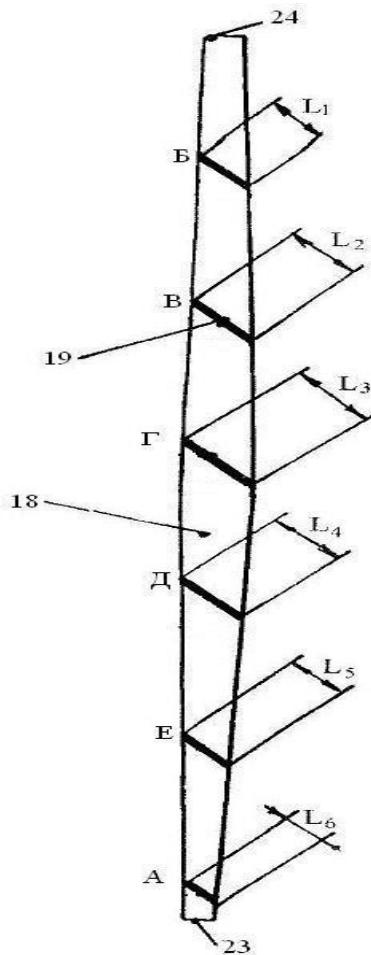


Рисунок 7 – Полоса после обрезки кромок прямоугольника

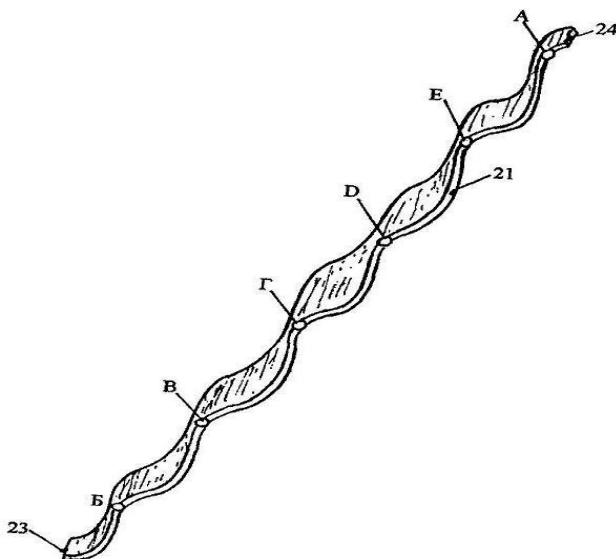


Рисунок 8 – Полоса согнутая волнообразно

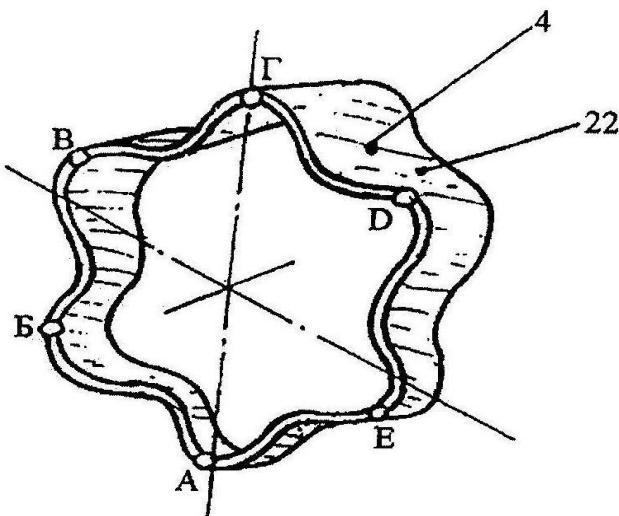


Рисунок 9 – Полоса, свернутая в кольцо

При движении частиц рабочих сред и обрабатываемых деталей по проходному сечению рабочей камеры с изменяющимися размерами и формой образуются попеременно зоны сжатия и разряжения в каждом сечении рабочей камеры 4 по всему объему, что интенсифицирует процесс отделочно-зачистной обработки и расширяет технологические возможности.

Технико-экономические преимущества возникают за счет выполнения рабочей камеры в виде тора, поверхность которого снабжена односторонними волнообразными винтовыми поверхностями двоякой кривизны в виде карманов криволинейной формы, которые и обеспечивают расширение технологических возможностей.

---

1. Иванов А.Н. Повышение эффективности и расширение технологических возможностей процесса обработки деталей в винтовых роторах: дис. ... канд. тех. наук. /А.Н. Иванов– Краснодар: 2002.- 221с.

## **УДК 621.9.047**

### **ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ**

*Сафонов С.В., Смоленцев В.П., Гребенщиков А.В.  
ВГТУ, ВМЗ, г. Воронеж, Россия*

После литья на поверхности заготовок остается слой покрытий с толщиной до 10 мм. При передаче изделий на механообработку требуется очистить их от загрязнений (пригара, формовочной земли, части керамических оболочек и др.). Использование для таких целей ручного труда вызывает повышение трудоемкости и себестоимости деталей, снижение конкурентоспособности изделий. Вибрационные операции очистки литья эффективны для мелких заготовок, а при обработке нежестких конструкций могут вызывать коробление изделий, потерю их точности и неисправимый брак.

#### **Метод ударных низкочастотных колебаний**

Из управляемых процессов удаления хрупких покрытий различной толщины наибольшие перспективы имеет

магнитноимпульсный метод с ударным действием бойка на заготовку. Технология такой очистки позволяет изменять энергию импульса, частоту ударных воздействий с гарантией от повреждения поверхностности литой заготовки с любыми размерами. Мощность импульса регулируется емкостью конденсаторов и величиной напряжения. На рисунке 1 приведены осредненные данные по интенсивности очистки от формовочной земли и загрязнений единичным импульсом с энергией 0,4 кДж плоских участков заготовок при подведении ударного бойка в середину очищаемого участка.

Для тонких (до 3 мм) стенок заготовки или тары за 1 импульс можно удалить большинство загрязнений с площади до 0,4-0,5 м<sup>2</sup> при свободной от элементов жесткости поверхности (участок очищаемой поверхности связан с остальной частью заготовки одним краем).

Если элемент обработки обрамлен хотя бы с 3 сторон силовыми составляющими заготовки или тары, то эффективность воздействия импульса снижается в 2-3 раза (рисунок 1). Степень очистки (отношение площадей без загрязнений к общей площади) составляет 70-90%, поэтому минимальное количество импульсов назначают 3-5, приближаясь при этом к области резонансных колебаний системы заготовки и покрытия. После этого степень очистки для случая 1 (рисунок 1) может достигать 100%.

С увеличением толщины стенки требуется повышать энергию импульса, которая ограничена механической прочностью заготовки (интенсивность воздействия бойка на обрабатываемый участок не должна вызывать его повреждения от удара). Для участков с элементами жесткости значительное увеличение числа импульсов может не дать положительного эффекта, особенно на границах элементов заготовки с различной толщиной. Поэтому принимается, что операцию очистки можно считать законченной, если устранена большая часть покрытия, а оставшиеся загрязнения занимают не более 20-30% очищаемой площади.

На рисунке 2 приведена трудоемкость удаления загрязнений с крупных тонкостенных литых и штампованных заготовок (энергия импульса 0,4 кДж, частота импульсов 0,2 Гц).

Из рисунка 2 видно, что удаление покрытий (загрязнений) происходит практически одинаково как для наружных (А), так и внутренних (Б) поверхностей с единой толщиной стенки.

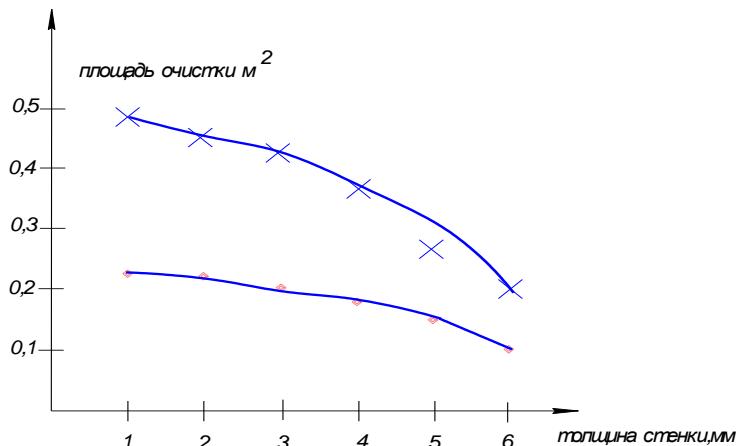


Рисунок 1 Изменение площади, очищаемой единичным импульсом, от толщины стенки заготовки: xxx – стенка не имеет элементов дополнительной жесткости; ... – стенка имеет обрамление из элементов жесткости.

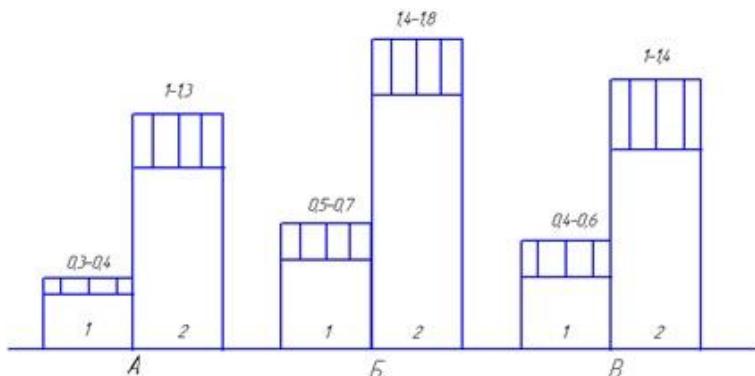


Рисунок 2 Время (минуты), затрачиваемое на удаление покрытий с толщиной 30 мм с  $1 m^2$  поверхности. Толщина стенки 3 мм (А), 6 мм (Б).

А, Б – наружные поверхности; В – внутренние поверхности (толщина стенки 3 мм). 1 – без элементов усиления жесткости; 2 – с жесткостью по периметру участка.

Наличие элементов жесткости (например, более толстых участков по контуру обрабатываемого элемента заготовки или обрамление тары уголками) ухудшает условия очистки импульсными методами и вызывает повышение трудоемкости до 1,5-1,8 раза.

При энергии импульса 0,4-0,5 кДж давление импульсного воздействия достигает 400-500 МПа, а повторяемость рабочих импульсов составляет 1-5 секунд.

Для таких режимов время удаления покрытий ( $\tau_0$ ) с поверхности составит

$$\tau_0 = \sum_1^m \frac{LH\tau_1}{F_1 K_n}, \quad (1)$$

где L – длина обрабатываемого участка заготовки;

H – ширина участка;

$\tau_1$  – время обработки единицы площади заготовки ;

$F_1$  – площадь, очищаемая от загрязнений за 1 импульс ;

К – коэффициент, учитывающий эффективность действия последующих импульсов (для  $1 < n \leq 5$  величина  $K=0,5-0,6$ );

n – число рабочих воздействий на обрабатываемый участок;

m - количество участков заготовки, подлежащих очистке.

Расчеты показали, что время удаления загрязнений можно снизить до 2-3 раз, если изменять энергию импульсов в зависимости от свойств очищаемой заготовки.

Аналогичные расчеты проводились для очистки тары, применяемой для перевозки сыпучих грузов (строительных материалов, формовочных смесей и др.). Полученные результаты приведены в таблице 1 (формовочные смеси, толщина покрытия после разгрузки на внутренней поверхности стенок 20-25 мм). Энергия импульса для стенок из стали от 0,2

кДж до 0,5 кДж (толщина стенок 1; 3 мм). Для алюминиевых стенок рекомендуется энергия импульса 0,05-0,2 кДж.

Таблица 1

Время очистки 1 м<sup>2</sup> стенок тары многоразового  
использования

Толщина стенки (мм) тары	Наличие элемента жесткости	Время (сек)	
		наименьшее	наибольшее
1 (материал – сталь)	отсутствуют	22	32
то же	имеется рамка	65	82
1 (материал – алюминиевый лист)	отсутствуют	23	42
то же	имеется жесткая рамка	46	53
3 (сталь)	отсутствуют	35	65
то же	элементы с 3-х сторон	48	132
5 (сталь)	отсутствуют	48	58
то же	элементы с 4 сторон	52	70
6 (сталь)	отсутствуют	48	75
то же	элементы с 3-х сторон	72	90

Время очистки для тары (таблица 1) близко к результатам (рисунки 1 и 2), полученным для случая очистки литых заготовок от остатков керамических форм и формовочных смесей. Поэтому формулу (1) можно использовать при нормировании трудоемкости подготовки тары к повторному использованию.

Сравнение трудоемкости удаления покрытий (загрязнений) с заготовок ручным и магнито-вibrационным методом показывает ускорение процесса за счет механизации на порядок и выше, снижение затрат на операцию в 2-5 раз.

**Заключение.**

1. Приведено технологическое и экономическое обоснование целесообразности использования импульсно-вibrационного способа удаления хрупких покрытий различной

толщины, что создало основу для проектирования рациональной номенклатуры продукции, наиболее пригодной для рассматриваемого случая.

2. На базе технико-экономического анализа разработаны рекомендации по выбору объектов обработки импульсно-вibrationным методом, что может составить основу для маркетинговых исследований при внедрении новой технологии и обосновании целесообразности приобретения оборудования для очистки изделий.

## **УДК 67.02**

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Лебедев В.А., Иванов В.В., Давыдова И.В.*

ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Анализ отечественной и зарубежной практики в области нанесения покрытий показал, что большинство разработок посвящено осаждению металлических покрытий на поверхность изделия гальваническим методом. В последнее время предметом интенсивных исследований стали механохимические процессы, обусловившие создание на их основе новых нетрадиционных экологически чистых и менее затратных технологий нанесения покрытий по сравнению с существующими способами. Результаты этих исследований послужили исходной предпосылкой для разработки модели управления процессом формирований покрытий в условиях виброволновых технологических систем, и выработки качественных, и количественных показателей оценки эффективности применения предлагаемого метода для нанесения покрытий различного функционального назначения.

Решение этого вопроса является актуальной задачей направленной на выбор оптимальной технологии нанесения покрытий, обеспечивающей требуемые параметры качества и эксплуатационных свойства поверхности слоя деталей при эффективных технико-экономических показателях процесса.

Статья посвящена рассмотрению сущности и обоснованию основных закономерностей формирования механохимических покрытий в виброволновых технологических системах с позиций энергетического подхода.

По способу образования, в основе которого лежит механизм формирования покрытия на поверхности металла, механохимические покрытия наносимые в виброволновых технологических системах подразделяются на три основные группы [ 1]: **Первая группа** объединяет виды покрытий сформированные непосредственно на поверхности металла без взаимного проникновения материала покрытия в основной металл; связь покрытия с металлом происходит на основе механического сцепления. **Вторую группу** представляют покрытия, сформированные в результате взаимного структурного взаимодействия материала покрытия и металла детали, обеспечивая механохимическую связь между ними. **Третью группу** составляют покрытия для которых сам металл является исходным материалом для покрытия в результате химического взаимодействия металла с химическими растворами на поверхности формируется соответствующее покрытие.

Отличительной особенностью этих покрытий от других способов нанесения является то, что их формирование происходит в условиях ударно-импульсного воздействия свободно движущихся сферических инденторов (металлических, фарфоровых, стеклянных ) на обрабатываемую поверхность. В результате динамического контакта частиц рабочей среды с поверхностью детали обеспечивается активация химических процессов протекающих в поверхностном слое при формировании покрытий, а также происходит изменение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя.

Из вышеприведённой классификации следует, что одни покрытия формируются путем механического сближения поверхности металла с покрываемым материалом, другие формируются в условиях химической реакций, а при наличии в граничном слое электростатических сил, процесс усложняется с образованием двойного электрического слоя, гидратацией, диффузией. Однако для всех покрытий формируемых в виброволновых технологических системах, не зависимо от

сложности химических процессов, механическая энергия неизменно остается главной активирующей силой. В результате виброволнового механического воздействия внешних сил происходит увеличение внутренней энергии системы, увеличивается энергия поступательного движения молекул, энергия внутримолекулярного колебательного движения атомов и атомных групп входящих в состав молекулы, энергия вращения электронов в атомах, энергия ядра атомов и другие виды энергии.

Первоисточником создания и роста покрытия являются зародыши, образуемые на базе локальных микрообъемов поверхностного слоя под воздействием химических реакций и механических внешних сил. В работе [2] показано, что с термодинамической точки зрения все элементарные акты механохимического процесса, протекающие в локальных микрообъемах поверхностного слоя, делятся на две характерные группы, отличающиеся кинетическими закономерностями. Первая группа элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок связаны с установлением связей и образованием зародышей и тем самым обуславливают накопления в локальном объеме поверхности скрытой энергии. Элементарные акты второй группы связаны с установлением и уничтожением связей, в результате чего происходит трансформация (превращение) необратимой механохимической энергии в тепловую, что проявляется в виде теплового эффекта. Таким образом, в соответствии с основным законом термодинамики – законом сохранения энергии при ее превращениях уравнение энергетического баланса вибрационного механохимического процесса образования зародыша на уровне локального микрообъема поверхностного слоя можно записать

$$A = \Delta U + q; \quad (1)$$

$$\Delta U = \Delta U_{\text{пм}} + \Delta U_{\text{пх}} + \Delta U_{\text{тм}} + \Delta U_{\text{тх}};$$

где  $\Delta U_{\text{пм}}, \Delta U_{\text{пх}}$  - изменение механической и химической потенциальной составляющей внутренней энергии локального объема;  $\Delta U_{\text{тм}}, \Delta U_{\text{тх}}$  – часть тепловой механической и химической энергии затрачиваемой на образование зародыша и повышающее его энергетическое состояние;  $q$  - часть тепловой энергии рассеивающейся в тело детали и окружающую среду.

Схема энергетического баланса вибрационного механохимического процесса представлена на рисунке 1.

Соотношение между составляющими энергетического баланса механохимического процесса при формировании покрытия могут быть самыми разнообразными и зависят от природы и структуры материала, а также условий, в которых протекает процесс нанесения покрытий. По величине этих соотношений можно судить о виде покрытия.

Рассматривая, сформировавшийся в процессе механохимического синтеза, зародыш как открытую термодинамическую систему, находящуюся, при установившихся механохимических условиях в соотношении локального равновесия, условие его образования можно представить в виде  $\Delta U = U_o$ , где  $\Delta U$ ,  $U_o$ - соответственно изменение мольной внутренней энергии системы и ее мольная энергия определяющая образование зародыша. Физический смысл этого условия заключается в том, что когда левая часть, соответствующая повышению внутренней энергии системы  $\Delta U$ , достигнет правой  $U_o$ , оцениваемой фундаментальной энергетической характеристикой, процесс образования зародыша достигнет своего завершения (равновесия).

Для оценки изменения внутренней энергии системы, определяющей образование локального зародыша при механохимическом процессе, использовано фундаментальное уравнение Гиббса, записанное в локальной форме

$$\Delta U = T \Delta S + p \Delta V + \sum \mu_i \Delta w_i, \quad (2)$$

где  $T$  - абсолютная температура;  $p$ - давление;  $S, V, \mu_i$ - мольные значения энтропии, объёма и химического потенциала;  $w_i$ - мольная доля  $i$ -того компонента системы.

Рассмотрение каждого компонента уравнения Гиббса для оценки изменения внутренней энергии материала, Больцмановской интерпретации энтропии, известных из теории сопротивления материалов выражений для оценки энергий упругих и пластических деформаций, а также выражения, устанавливающего изменение свободной энергии в локальном микрообъёме в процессе химического взаимодействия компонентов покрытия, получена энергетическая модель образования зародышей при механохимическом процессе в условиях виброволновых технологических системах

$$TR \ln \left( \frac{t}{\tau_0} \right) + V_m 10^{-6} \left( \frac{\sigma^2}{2E} + k_a \sigma d/D \right) - \Delta G^0 = U_0 , \quad (3)$$

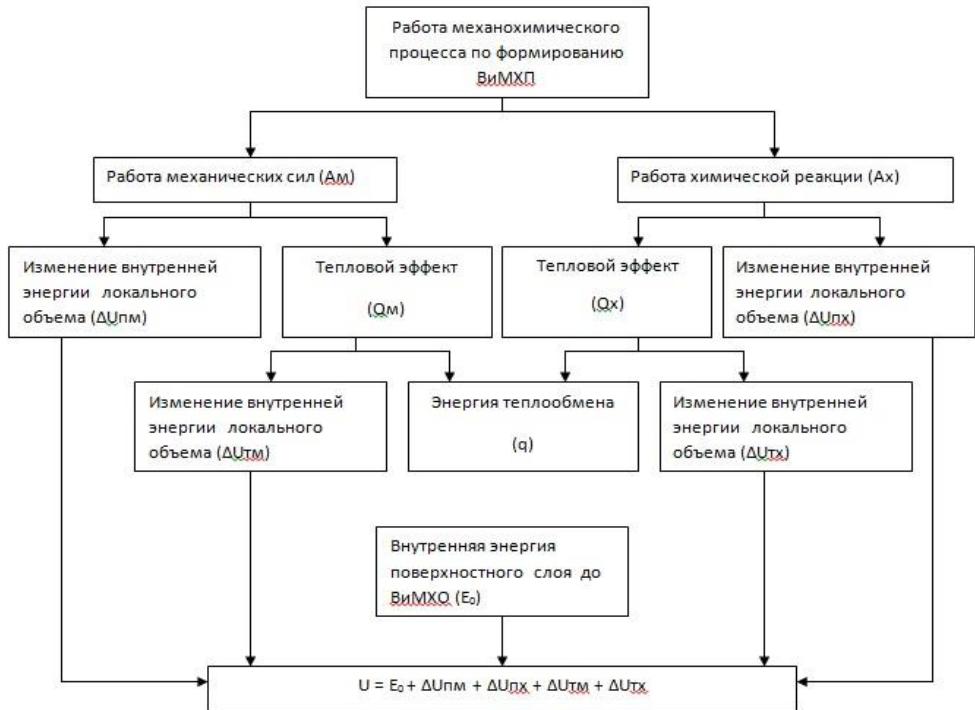


Рис.2. Схема энергетического баланса ВиМХО.

Энергетическая модель (3) учитывает вклад в процесс формирования покрытия поверхностного слоя повышения связанной энергии за счёт роста энтропии( первое слагаемое), увеличения энергии упруго-пластических искажений кристаллической решётки в результате механического воздействия частиц рабочей среды(второе слагаемое), изменения внутренней энергии покрытия и поверхностного слоя в результате химического взаимодействия материала покрытия с веществом применяемого для покрытия. Роль каждого из них в кинетике формирования вышеприведённых классификационных групп вибрационных

механохимических покрытий согласно предложенной модели схематично проиллюстрирована на Рис 2, из которого видно, что основной вклад в процесс формирования механохимических покрытий первой группы вносит деформационное слагаемое, монотонно растущее со временем

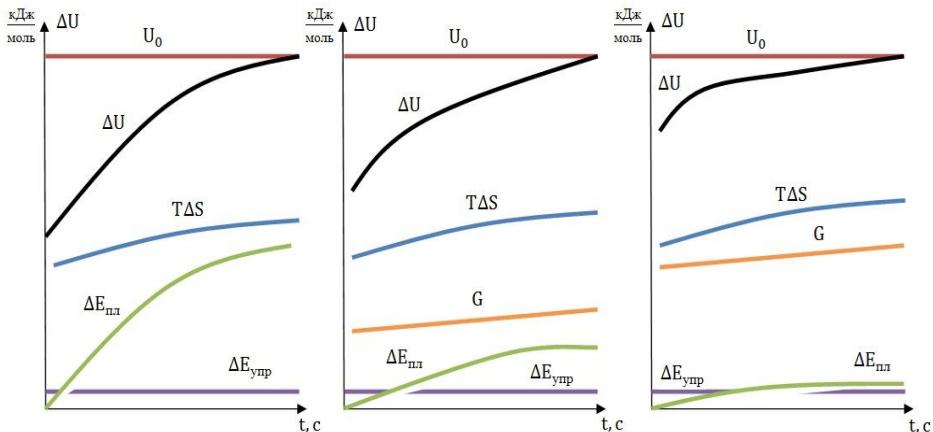


Рис.2 Схема накопления энергии в локальном микрообъёме материала при формировании механохимических покрытий: а) первой группы, б) второй группы, в) третьей группы.

. Формирование покрытий второй группы – результат деформационного и химического слагаемых. При формировании механохимических покрытий третьей группы ведущая роль принадлежит химической составляющей модели.

Полученная энергетическая модель (3) позволяет на стадии технологической подготовки производства решить ряд оптимизационных технологических задач по обеспечению качества и эксплуатационных свойств поверхностных слоёв деталей путём нанесения на них в условиях виброволновых технологических систем покрытий различного функционального назначения.

---

1.Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий : монография / В.В. Иванов - Ростов н/Д:Издательский центр ДГТУ, 2007-162с.

2.Лебедев В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования: монография / В.А. Лебедев – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007 – 156 с.

**УДК 658.512:621.9**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ  
ТРАНСФОРМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН**

Хейфец М. Л., Васильев А. С., Клименко С. А., Танович Л.

Отделение физико-технических наук НАН Беларусии, г. Минск,

Белоруссия, МГУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН

Украины, г. Киев, Украина,

Белградский университет, г. Белград, Сербия

Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем оказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [1, 2]. Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их параметров. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции и переходы, испытывая воздействия технологических факторов [3, 4].

В технологической цепочке существуют своего рода «барьеры». Некоторые технологические факторы преодолеть эти «барьеры» не могут и в таком случае их влияние на конечные свойства объекта отсутствуют. Другие факторы такие «барьеры» проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [1, 3]. Самые существенные «барьеры» проявляются на термических операциях, а также на операциях, сопровождающиеся поверхностным деформированием и упрочнением, так как они изменяют микроструктуру обрабатываемого материала, микротопографию формируемой поверхности, приводят к короблению детали и искажению ее формы. В ходе этих операций различные пороки поверхности, такие как структурная неоднородность, поры, микротрешины, могут развиваться или «зазлеваться». Следовательно, процессом технологического наследования можно управлять, с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в

течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно – ликвидировать в его начале [2, 4].

**Технологическая и эксплуатационная трансформация параметров качества.** Технологический процесс изготовления и эксплуатации деталей может быть представлен в виде графа, выделяющего при изготовлении заготовительные, черновые операции, чистовые и отделочные операции, а так же стадии эксплуатации [2]. Граф, как правило, является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой.

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса и эксплуатации представляет собой заготовку. Конечная вершина – готовая деталь в процессе эксплуатации. Ориентированные ребра графа показывают передачу свойств детали при обработке и в эксплуатации. Передача ребра описывается коэффициентом наследования  $K$ , показывающим количественное изменение свойства и равным отношению предыдущих  $S_j$  и последующих  $S_{j+1}$  значений свойства [4]:

$$K = S_j / S_{j+1}.$$

Помимо прямой передачи свойств при технологическом наследовании целесообразно оценивать их взаимовлияние. Общую структуру процессов можно представить как сложную многомерную систему, в виде последовательности изменения основных параметров качества детали [2]. На вход технологической системы поступают различные характеристики заготовки  $\{S_{10}, S_{20}, \dots, S_{m0}\}$ , а на её выходе обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для готовой детали  $\{S_{1p}, S_{2p}, \dots, S_{mp}\}$ . Эти изменения определяются действием совокупности технологических  $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  факторов для каждой операции  $\varphi$ , рассматриваемого процесса [3].

Так для параметра качества  $S$  после окончательной обработки [2]:

$$S_p = a_p S_{p-1}^{b_p}$$

Количественные связи наследственности, зависящие от выбора метода обработки, определяются коэффициентами  $b$ , а основные условия обработки внутри этого метода –

коэффициентами  $a$ . Выполнив преобразования с уравнениями для предшествующих операций  $\varphi_{p-1}, \varphi_{p-2}, \dots, \varphi_1$  получают общую математическую модель изменения параметра качества для всего процесса:

$$S_p = a_p a_{p-1}^{b_p} a_{p-2}^{(b_p b_{p-1})} \dots a_1^{(b_p b_{p-1} \dots b_2)} S_0^{(b_p b_{p-1} \dots b_1)}$$

Коэффициент наследственности  $a_i$  описывает влияние факторов  $t_1, t_2, \dots, t_n$  на рассматриваемый параметр качества  $S_j$  для операции  $\varphi_i$  и может быть представлен [3]:

$$a_i = k_{l_0} t_{l_1}^{k_{l_1}} t_{l_2}^{k_{l_2}} \dots t_{l_n}^{k_{l_n}}$$

где  $k_0, k_1, k_2, \dots, k_n$  – эмпирические коэффициенты влияния технологических факторов.

Анализ зависимостей показывает, что весь процесс может быть выражен в виде суммы действия окончательной операции и некоторой доли влияния предшествующих операций на исходное состояние заготовки  $S_0$ , которые определяются коэффициентами наследственности  $b_1, b_2, \dots, b_p$ . Если на какой-либо операции  $\varphi_i$  коэффициент технологической наследственности  $b_i = 0$ , то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данной операции, что может служить интерпретацией действия на операции  $\varphi_i$  непреодолимого «технологического барьера» [2, 4].

**Технологические и эксплуатационные барьеры при трансформации свойств.** Изучение последовательности воздействий концентрированными потоками энергии на операциях комбинированной обработки, анализ формируемых параметров качества сопровождаются исследованием технологической наследственности образующихся диссипативных структур (рис. 1).

Исследование тепловых и механических воздействий на поверхностный слой показало, что концентрированный нагрев разупрочняет поверхностный слой за счет роста зерна и растворения упрочняющих фаз (рис. 1, б). Глубина фазовых превращений определяется границей распространения теплового потока. Инструмент срезает дефектный слой и упрочняет поверхность деформированием, завальцовывая трещины, поры, измельчая зерно. Проникновение механических

воздействий также происходит на определенную глубину (рис. 1, а).

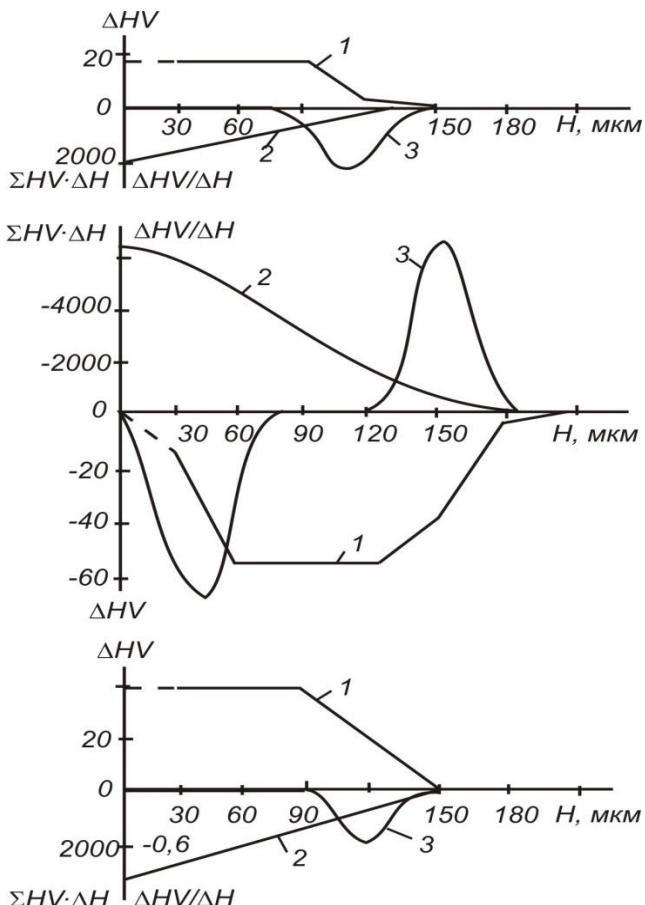


Рис.1. Зависимости распределения по глубине поверхностного слоя материала:

- 1- изменения твердости  $\Delta HV$ ; 2 – общего упрочнения  $\Sigma HV\Delta H$ ;
- 3 – скорости приращения упрочнения  $\Delta HV/\Delta H$ ; после резания с нагревом недостаточной ( $\alpha$ ), избыточной ( $\beta$ ) и
- рациональной ( $\delta$ ) интенсивности

С позиций технологической наследственности, импульс энергии передается обрабатываемой поверхности, а скорость и ускорение распространения энергии отражаются на всех участках прохождения импульса.

О скорости распространения можно судить по распределению значений упрочнения по глубине поверхностного слоя (рис. 1, кривые 1). Величина энергии импульса определяется площадью, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием (рис. 1, кривые 2). Ускорение при прохождении импульса, т.е. первая производную от скорости или вторая от энергии импульса, определяется графическим дифференцированием кривой упрочнения (рис. 1, кривые 3). Результаты дифференцирования описывают глубину проникновения импульса, следовательно, вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей поток энергии в поверхностном слое, можно рассматривать как технологический барьер.

Изучение технологических барьеров показывает, что они достаточно точно описываются нормальным законом распределения с различными величинами дисперсий. При упрочнении и разупрочнении барьеры располагаются по разные стороны от оси координат (рис. 1, кривые 3).

При достаточной близости технологических барьеров в результате нагрева увеличивается пластичность поверхностного слоя и деформации проникают на большую глубину. Увеличение зоны и степени деформации, сопровождающееся усилением поглощения тепла, препятствует прохождению и приближает границу распространения теплового потока к поверхности. Совместное действие механических и тепловых потоков приводит к совмещению технологических барьеров и по всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы (рис. 1, в).

**Заключение.** Технологическое наследование эксплуатационных свойств в процессах изготовления деталей целесообразно описывать графиком, отражающим коэффициенты передачи и взаимовлияния физико-механических и геометрических параметров.

Вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей

поток энергии в поверхностном слое, следует рассматривать как технологический или эксплуатационный барьер.

Исследования поддержаны грантом ГКНТ - БРФФИ Т14СРБ-10 по совместному белорусско-сербскому проекту.

- 
1. Технологические основы высокoeffективных методов обработки деталей / П. И. Ящерицын [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136 с.
  2. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
  3. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
  4. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.

**УДК 621.9.048**

## **ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Дудников А.А., Беловод А.И.*

ПГАА г. Полтава, Украина

В процессе эксплуатации машин снижается их работоспособность обычно из-за разрушения поверхностного слоя. Поэтому в технологических процессах все больше внимания уделяется операциям поверхностного пластического упрочнения, которые обеспечивают оптимальные параметры качества поверхностного слоя, повышающие его износостойкость.

Экономическая целесообразность восстановления деталей обусловлена прежде всего возможностью повторного и неоднократного использования изношенных деталей, себестоимость восстановления которых, как правило, не превышает 15...30% стоимости новых, а расход материалов в 15...20 раз ниже, чем на их изготовление. Эксплуатационная надёжность деталей остается довольно низкой. Ресурс деталей после восстановления составляет в среднем не более 60...80% ресурса новых [1].

Одним из основных направлений повышения качества восстанавливаемых (изготавливаемых) деталей является совершенствование существующих технологических процессов,

обеспечивающих необходимые прочность, пластичность, коррозионную стойкость, повышенную износостойкость.

Решение проблемы повышения качества связано с повышением долговечности и эффективности восстановления изношенных деталей, работающих в условиях воздействия значительных нагрузок, на базе разработки теоретических и технологических основ создания ресурсосберегающих процессов, заключающихся в применении прогрессивных методов обработки давлением, способствующих восстановлению размеров, формы деталей, структуры материала и физико-механических свойств рабочих поверхностей.

Для целой группы деталей, работающих в условиях воздействия знакопеременных нагрузок, таких как поршневые пальцы, втулки верхних головок шатунов и др. автотракторных двигателей, а также деталей, работающих в абразивной среде (диски копачей свеклоуборочных машин, диски сошников зерновых сеялок, плужные лемеха, культиваторные лапы и др.) применение метода пластической деформации ограничено из-за недостаточного теоретического обоснования направлений перемещения металла при обработке давлением с использованием вибрационных колебаний рабочего инструмента [2].

Анализ условий работы указанных деталей, величины и знака действующих на них нагрузок, видов изнашивания способствует выбору рационального технологического процесса восстановления, инструмента и оборудования для этих целей, а также оптимальных режимов обработки.

Поршневые пальцы автотракторных двигателей изготавливают из цементированной стали 12ХН3А, Ст.45 селектированной по углероду. Основным их дефектом является износ по наружной поверхности на участках контакта с втулкой верхней головки шатуна и в бобышках поршня.

Проведенными исследованиями установлено, что износ поршневых пальцев составляет 0,05...0,09 мм. При износе 0,02мм уменьшение их размеров не превышает 0,3%, а массы – 0,08%. На показатели прочности и износостойкости рабочей поверхности эти изменения существенно не влияют.

Нами разработаны технологические процессы восстановления поршневых пальцев и втулок верхних головок

шатунов автотракторных двигателей методом вибрационного деформирования.

При вибрационном деформировании происходят существенные изменения свойств обрабатываемого материала, которые, прежде всего, оказывают большое влияние на эксплуатационную стойкость восстановленных деталей. Достигаемый уровень свойств материала деформированных деталей связан с изменением их макро- и микроструктуры.

Установлено, что структура материала поршневых пальцев двигателей ЗМЗ-53 и ЗМЗ-66, подвергнутых вибрационному нагружению, в зоне обработки более равномерная и мелкозернистая. При вибрационной обработке зерна материала имеют некоторую вытянутость в направлении движения обрабатывающего инструмента – пуансона.

Глубина деформированного слоя в условиях вибрационного нагружения составила 700...800 мкм, а обычного 350...400 мкм [3]. Увеличение глубины деформирования способствует упрочнению приконтактных с пуансоном слоев материала и повышению износстойкости.

Величина износа поршневых пальцев, восстановленных вибрационным деформированием в 1,33 раза меньше по сравнению с восстановленными обычной раздачей, а стоимость в 1,39 раза ниже по сравнению с традиционной применяемой технологией.

Известно, что диски копачей свеклоуборочных машин, диски сошников зерновых сеялок, плужные лемеха, изготовленные из Ст.75, работают в условиях абразивного изнашивания, вызывающего в их материале ухудшение физико-механических свойств, снижающих износстойкость указанных деталей.

К рабочим органам свеклоуборочных машин КС-6, КС-6В, РКМ-6 относятся дисковые ножи, к состоянию режущих кромок которых предъявляются особые требования по углу заточки и толщине. В процессе работы под действием абразивных частиц лезвие усиленно изнашивается, что приводит к увеличению толщины режущей кромки и ухудшению качества выполнения технологического процесса.

Анализ полученных характеристик твердости материала лезвий дисков копачей, восстановленных приваркой сегментных

шин из стали 45, наплавленных сормайтом и упрочненных вибрационным деформированием, показал, что в результате вибрационного воздействия на 40..45% возрастает твердость обработанной поверхности лезвия диска, а величина радиального износа диска в 3..4 раза ниже по сравнению с другими технологиями восстановления при следующих режимах вибрационного упрочнения: амплитуда колебания обрабатывающего инструмента  $A=0,5\text{мм}$ ; частота колебания  $2100\text{мм}^{-1}$ ; время упрочнения 30с.

Для дисков сошников посевных машин характерен износ лезвия вследствие непосредственного контакта с абразивной средой. Для этих машин характерен расход большого числа деталей рабочих органов для замены износившихся в процессе эксплуатации.

Дисковые сошники утрачивают свою работоспособности вследствие уменьшения наружного диаметра дисков в результате изнашивания, что значительно снижает качество заделки семян в грунт. Установлено, что сошники с расстоянием между режущими кромками дисков 3..4,5 мм укладывают 95% семян на необходимую глубину 30...50мм, а изношенные по наружному до 320...330 мм – лишь 43% [4].

В процессе эксплуатации диски сошников зерновых сеялок могут иметь следующие основные неисправности: коробление, деформирование, износ по наружному диаметру и др.

В ремонтном производстве имеют некоторые применение следующие методы их восстановления: навивание металлической ленты из стали 65Г; приваривание к диску сектора вольфрамовым электродом; контактное шовное сваривание внахлестку с дальнейшим упрочнением порошковыми материалами на основе сормайта и др.

Указанные выше способы восстановления не обеспечивают надлежащего качества (однородности структуры и свойств), высокой износостойкости при образованном изнашивании.

С учетом указанных основных недостатков существующих способов ремонта дисков, а также условий их работы при разработке нового технологического процесса восстановления рабочей поверхности по наружному диаметру необходимо: параметры сварного соединения при приваривании ленты

смоделировать таким образом, чтобы поверхность соединения не мешала движению семян; в рабочей поверхности диска создать условия для релаксации напряжений растяжений и возникновения сжимающих напряжений.

Установлено, что пластическая деформация определяется наличием дислокаций и возможностью их перемещения. Так при вибрационных колебаниях активизация дислокаций происходит во всех зернах, прилегающих к поверхности, то процесс скольжения дислокаций совершаются практически одновременно во всех кристаллах [5]. При вибрационном деформировании формируются блоки зерен, в результате чего увеличивается протяженность их границ и тем самым возникает больше зон скопления дислокаций. Этим самым можно объяснить механизм упрочнения материала обрабатываемой детали при вибрационном нагружении.

Для восстановления дисков сошников нами разработан метод поверхностного пластического деформирования с применением механических колебаний обрабатывающего инструмента, позволяющий значительно повысить их долговечность за счет изменения физико-механического состояния и свойств обрабатываемой поверхности, что обеспечивает повышение их ресурса.

Износные испытания и исследования свойств материала новых дисков из стали 65Г и дисков, восстановленных приваркой сегментов из стали 45 с наплавкой сормайтом с последующим вибрационным упрочнением показали, что износстойкость дисков по разработанной нами технологии в 1,92 выше, чем у новых дисков.

В процессе эксплуатации плугов их рабочие органы испытывают целый ряд факторов (напряжения в материале; окружающая среда; состав обрабатываемой почвы; накопление повреждений и др.), которые ухудшают их технические характеристики и работоспособность [6].

В повышении надежности и долговечности рабочих органов плугов значительная роль отводится конструктивным решениям и упрочняющим обработкам их рабочих поверхностей. Актуальность данного вопроса обусловлена необходимостью разработки и применения альтернативных энергосберегающих и

эффективных в эксплуатации методов обеспечения надёжности рабочих органов путём упрочняющих обработок.

Основная задача при восстановлении плужных лемехов состоит в выборе эффективного технологического процесса, позволяющего восстановить не только заданные геометрические параметры, но и обеспечит их высокую износостойкость.

Известно несколько способов упрочнения и восстановления плужных лемехов: оттяжка, заточка, наплавка сормайтом, газоплазменная наплавка износостойкими порошками и др.

Следует отметить, что указанные способы ввиду недостаточно высокого качества восстановления изношенных поверхностей, из-за высокой сложности и стоимости обработки не нашли пока должного применения в сельскохозяйственном производстве.

Применение технологии упрочнения обеспечивает создание запаса надёжности технологического процесса восстановления, поскольку введением специальных операций достигаются более высокие эксплуатационные свойства восстанавливаемых деталей. В этом плане представляют особый интерес разработки по упрочнению методом вибрационного деформирования.

Разработанная нами технология восстановления изношенных поверхностей лемехов пластическим деформированием с использованием вибрационных колебаний обрабатывающего инструмента способствует существенному изменению свойств поверхностных слоев.

Твердость материала по глубине поверхностного слоя лемеха в зависимости от технологического процесса восстановления составила: восстановленных приваркой шин из стали 45 с наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением – 71...75 HRC; новых лемехов из стали Л-53, подвергнутых вибрационному упрочнению 66...68 HRC; новых лемехов из стали 65Г и упрочненных вибрационным деформированием – 57...60 HRC.

Твердость лезвия лемехов, восстановленных приваркой шин из стали 45 наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением в 1,23...1,35 раза выше твердости лемехов из стали 65Г без вибрационного упрочнения.

В результате вибрационного воздействия на наплавленный метал на 23...35% возрастает твердость обработанной поверхности лезвия лемеха, а износостойкость в 1,74 раза выше по сравнению с новыми лемехами из стали 65Г.

1. Дудников А.А. Проектирование технологических процессов сервисных предприятий/ А.А.Дудников, П.В.Писаренко, А.И.Беловод, И.А.Дудников, А.П.Кившик. – Винница: 2011. – 400с.
2. Бабичев А.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д.Мотренко и др. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 191с.
3. Дудников А.А. Анализ напряженного состояния поршневых пальцев/ А.А.Дудников, А.П.Кившик, Т.Г.Лапенко// Вопросы вибрационной технологии. Мезузовский сб.науч.ст. – – Ростов н/Д: - 2003. С. 140-144.
4. Войтюк Д.Г. Сельскохозяйственные машины/ Д.Г.Войтюк, Г.Р.Гаврилюк. – К.:Каравелла, 2004. – 552с.
5. Скобло Т.С. Анализ факторов влияющих на определение связи твердость – коэрцитивная сила/ Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, М.В. Марченко// ХНТУСХ: сб. – 2005. – вып.39. – С.264-2701.
6. Рыбак Т.И. Поисковое конструирование на основе оптимизации ресурса мобильных сельскохозяйственных машин/ Т.И. Рыбак – Тернополь: ВАТ «ТВПК», 2003. – 332с.

## УДК 621.927

### УТИЛИЗАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФРАКЦИИ ШЛИФОВАЛЬНОГО ШЛАМА ПО МАГНИТОВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Вернигоров Ю.М., Плотников Д.М., Гордин Ю.А.  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Успехи в развитии теории колебаний и использовании вибрационных процессов, разработка на их основе устройств все больше повышают интерес к этой проблеме. Современное производство, экологию и другие отрасли трудно представить без созданных к настоящему времени многообразия вибрационных технологий [1]. Это подтверждает актуальность проблемы, перспективы её развития, целесообразность постановки и решения, новых более масштабных задач.

Значение вторичной переработки отходов заключается в следующем.

- Во-первых, ресурсы многих материалов на Земле ограничены и не могут быть восполнены в сроки, сопоставимые со временем существования человеческой цивилизации.
- Во-вторых, попав в окружающую среду, материалы обычно становятся загрязнителями.
- В-третьих, отходы и закончившие свой жизненный цикл изделия часто (но не всегда) являются более дешевым источником многих веществ и материалов, чем источники природные.

Особое место в деле утилизации отходов по-прежнему занимает проблема переработки шламов шлифовальных производств. Связано это главным образом с целым рядом свойств шламов, не позволяющих перерабатывать его методами классической магнитной сепарации. Шлам представляет собой трудно разрушимый конгломерат металлических частиц с вкраплениями абразива и связки, пропитанные СОЖ. Широкие возможности для повторного привлечения в оборот шламовых отходов открывает магнитоволновая технология сепарации [2].

Особое место занимают порошки ферромагнитных материалов, что объясняется высокими значениями сил магнитостатической и когезионной природы. Например, порошки магнитожестких материалов стремятся к образованию разновеликих кластеров, магнитные моменты которых невелики из-за частичного замыкания магнитных потоков частиц кластеров. Из известных к настоящему времени силовых полей, обеспечивающих устойчивое магнитокипящее состояние порошков магнитожестких материалов, наибольший интерес представляет суперпозиция однородного и неоднородного переменных магнитных полей. В состоянии магнитокипения происходит разрушение порошковых кластеров и, как следствие, эффективное выделение немагнитной фракции из порошков ферромагнитных материалов[3].

Из возможных моделей разрушения порошковых кластеров в магнитовибрирующем слое наибольший интерес представляют две.

- Разрушение за счет виброреологического эффекта, то есть кажущегося перехода сухого трения в вязкое.

- Разрушение за счет высокого значения градиента индукции магнитного поля.

Аbrasiv составляет примерно 6 – 10 % от общей массы шлама. На рис. 1 представлен абразив, полученный сепарацией шлама шлифовального производства стали марки ШХ15. Частицы практически не покрыты остатками связки, используемой в шлифовальном инструменте. Так же практически полностью отсутствуют примеси.

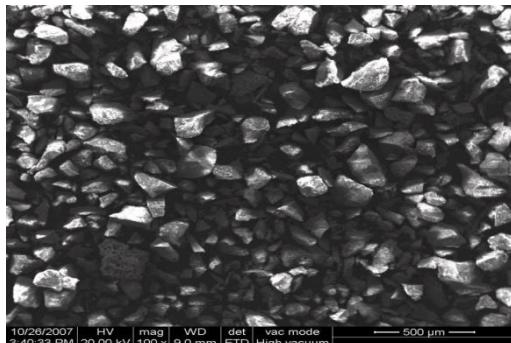
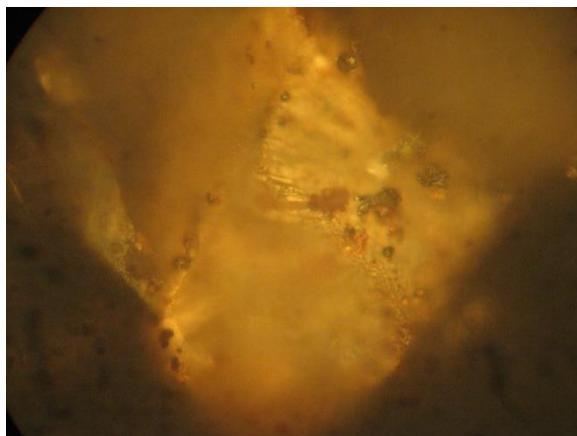


Рис.1 Электрокорунд полученный сепарацией шлифовального шлама

На рис. 2 представлены фотографии частицы абразива, на которых видно, что на поверхности частицы электрокорунда имеются мельчайшие вкрапления стальных капель. Примеси составляют порядка 1 – 2% от общей площади поверхности частицы абразива.

В процессе магнитоволновой сепарации использовался шлифовальный шлам завода ГПЗ – 10 [4]. На данном производстве применяется абразивный инструмент на основе белого электрокорунда. Электрокорунд белый получают плавлением глинозема в электродуговых печах. Глинозем является продуктом обогащения бокситовых глин. Содержание корунда в глиноземе 98–99% и 1–2%-алюмината натрия  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ . Плотность – 3.90-3.95г/см<sup>3</sup>. Микротвердость – 19.6-20.9ГПа. Как более твердый материал, используется в инструменте с твердой связкой (керамика). Наиболее

эффективен при обработке чугуна, нержавеющей стали. Используется также, в шлифшкурке и свободном виде



а)



б)

Рис. 2 Частица электрокорунда

а – неофот, б – растровый микроскоп

Процесс магнитовибрационной сепарации шлама, основанный на разделение магнитной и немагнитной фракций шлама в магнитовибрирующем слое, образованном в общем

межполюсном пространстве двух электромагнитов. Эффективность разделения определяется степенью разрушения агрегатов мелкодисперсной металлической фракции, в объёме которых содержится абразивная крошка.

Исследования получаемого сепарацией шлама абразива показали его относительную чистоту с незначительными примесями, в основном вкрапления мельчайших частиц металла в зерне абразива. Проведенный анализ потенциально возможных областей применения восстановленного из шлифовального шлама абразива выявил, что наиболее подходящим является его внедрение в литейное производство в качестве оgneупорного облицовочного материала одноразовых форм для литья по выплавляемым моделям.

Для определения эффективности дальнейшего использования получаемого абразива в литейном производстве в качестве материала для облицовочного слоя оболочек были проведены следующие исследования. В качестве образца было изготовлено две модели (4), (5) и припаяны к одному стояку (2) (рис. 3). На образец (4) наносили облицовочный слой промышленного электрокорунда, а на второй образец (5) – полученного сепарацией шлама шлифовального производства подшипников.

В процессе литья по выплавляемым моделям применяют две формы. Первую форму используют для изготовления моделей, вторая форма – литейная, изготавливаемая на основе мелкого песка и связующего вещества. Конструкция модельной формы – пресс-формы зависит от вида производства. Для экспериментального модельного блока было изготовлено два одинаковых образца в виде прямоугольных брусков из выплавляемого модельного состав марки Р-3, основными компонентами которого являются парафин и стеарин.

Модельный состав расплавлялся в водяном терmostате и заливался под давлением 0,5...0,6 МПа/мм<sup>2</sup> в пресс-форму. После этого модели зачищались и собирались в блок. Сборку модельного блока (рис. 3) выполняли путем спайки моделей (4) и (5) со стояком (2) через питатели (3) с помощью специального паяльного оборудования.

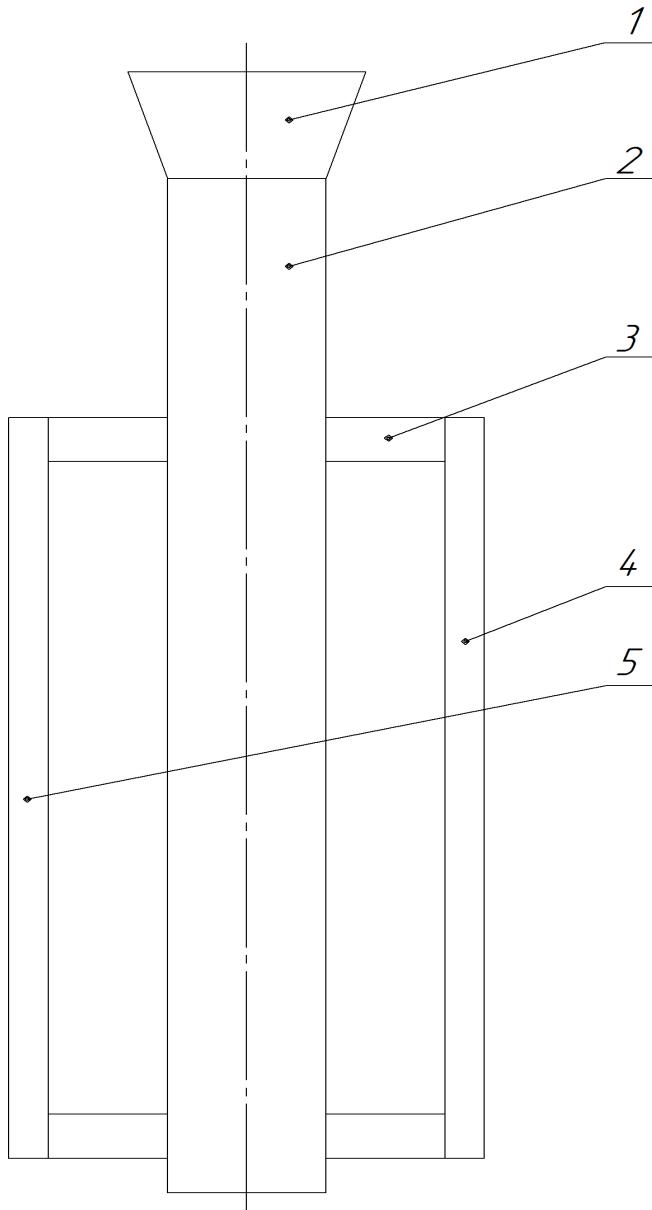




Рис. 3 Модельный блок

1 – заливочная горловина, 2 – стояк, 3 – питатель, 4 и 5 -  
образцы

Для изготовления литейной формы использовали супензию, состоящую из мелкодисперсного кварцевого песка (маршалита) и жидкого связующего вещества (гидролизованного этилсиликата) марки ЭТС-40, приготовляемого на основе этилового спирта. В состав огнеупорной формовочной смеси (супензии) входят около двух весовых частей пылевидного прокаленного огнеупорного материала (пылевидного кварца  $\text{SiO}_2$ , или электрокорунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и одной весовой части связующего материала (гидролизованного раствора этилсиликата – прозрачной жидкости желтого цвета с содержанием  $\text{SiO}_2$  40%).

Супензию на блок наносили погружением (рис. 4). Для удержания на поверхности блока супензии на него наносили электрокорунд в кипящем слое (рис. 5). Модель 1 покрывалась обычным электрокорундом, а модель 2 – полученным при сепарации шлама. Последующие 7 слоев набирались с использованием шамотной крошки. Свеженанесенное покрытие не обладает прочностью и удерживается на поверхности модели только благодаря смачиванию.

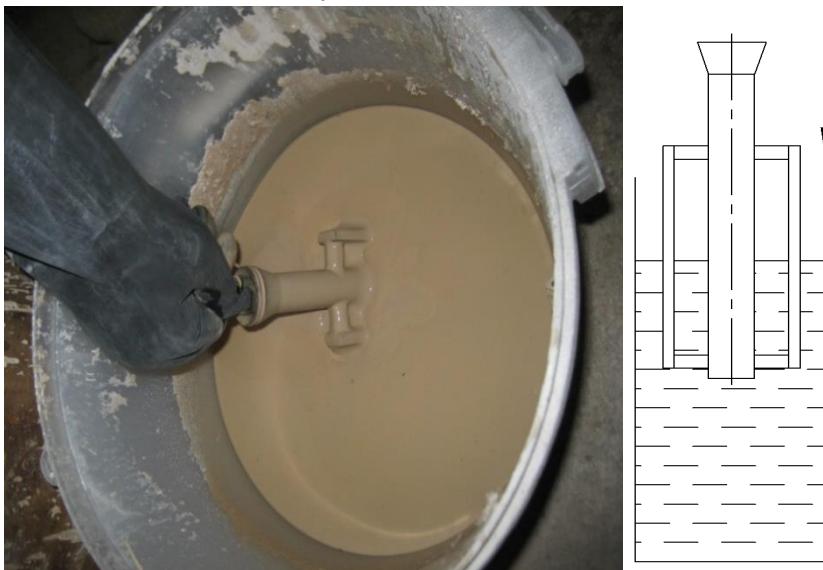


Рис. 4 Нанесение супензии на модельный блок

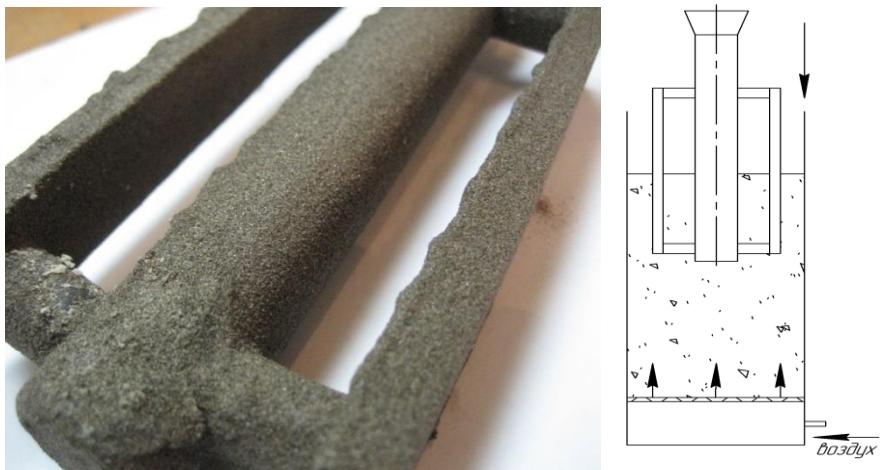


Рис. 5 Нанесение электрокорунда

Для придания прочности покрытию его сушили, в процессе чего одновременно с испарением влаги происходило затвердевание связующего вещества этилсиликата (переход его из золя в гель). Сушка 2-го и последующих слоев происходила 2 – 4 часа при температуре 18 – 20°C. Выплавление моделей осуществлялось в горячей воде. Для этого блок моделей с формой помещался литниковой частью вверх в корзину, погружаемую на 10 – 15 минут в воду с температурой 85 – 90°C. После выплавления модельного состава модельный блок прокаливался для удаления из него остатков модельного состава и влаги. При прокаливании форму нагревали до 900 – 1000°C, для обезвоживания и повышения литейных свойств. Перед прокаливанием оболочки засыпалась в опоке наполнителем. В качестве наполнителя применялась смесь песка и шамотной крошки (рис. 6).

Прокаливание длилось 4 часа. Непосредственно после прокаливания форма остывала до 500°C и заливалась расплавом латуни марки ЛС59, полученным в электрической индукционной печи. После охлаждения блока отливок форму разрушали и очищали от следов керамического покрытия путем погружения в каустическую соду на 3 – 4 часа. Полученная отливка представлена на рис. 7.

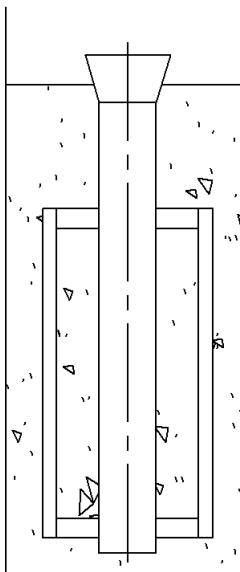


Рис. 6 Заформованная корковая форма оболочки



Рис. 7 Отливка

Для сравнения качества поверхности образцов отливок были произведены сравнительные замеры с помощью профилометра. Полученные усредненные данные представлены в таблице 1. Из приведенных в таблице данных видно, что разница в качестве поверхности образцов минимальна и принадлежит к классу шероховатости 6а (ГОСТ 2789-73) / 8(ISO1302).

Литье по выплавляемым моделям применяют в приборостроении для изготовления отливок различной сложности из любых сплавов массой от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов с толщиной стенок 0,4 – 20 мм, точностью размеров до 12 квалитета и шероховатостью поверхности до  $R_z = 20$  мкм. Данным способом литья изготавливают отливки любой конфигурации 1...5 групп сложности. Точность геометрических размеров соответствует 3...8 классам (ГОСТ 26645-85).

Таблица 1 Характеристики поверхностей отливок образцов

№	Обозначения	Образец 1	Образец 2
1	Класс шероховатости	6а (ГОСТ 2789-73) / 8(ISO1302)	6а (ГОСТ 2789-73) / 8(ISO1302)
2	$R_a$ среднеарифметическое отклонение, мкм	2,018	3,292
3	$R_z$ высота неровностей по 10 точкам, мкм	15,2	27,66
4	$R_{max}$ , $R_y$ максимальная высота неровностей, мкм	25,58	49,76
5	$R_p$ высота максимального выступа, мкм	10,89	32
6	$R_v$ , $R_m$ глубина максимального выступа, мкм	14,684	17,762
7	$S_m$ средний шаг неровностей, мкм	200,4	265,4
8	$S$ средний шаг местных выступов, мкм	25,64	25,8
9	Δа среднеарифметический наклон профиля, гр.	3,578	3,944
10	Δq среднеквадратичный наклон профиля, гр.	5,356	6,63
11	$I_0$ относительная длина профиля	1,00	1,006
12	$R_q$ среднеквадратичное отклонение, мкм	2,982	5,444
13	$L_0$ длина растянутого профиля, мкм	10020	10060
14	$\lambda_a$ средняя длина волны, мкм	204,8	289
15	$\lambda_q$ среднеквадратичная длина волны, мкм	137,2	172,8

### Выводы.

- Полученные результаты исследований в области литья по выплавляемым моделям показали, что применение в качестве материала для облицовочного слоя электрокорунда,

полученного сепарацией шлифовального шлама подшипникового производства не ухудшает качество получаемых отливок, а, следовательно, может заменить собой дорогостоящий абразив.

- Применение электрокорунда извлеченного из шлифовального шлама позволяет получать отливки с шероховатостью поверхности удовлетворяющие требованиям ГОСТа аналогичного и для промышленного абразива.

---

1. Болога М.К. Некоторые особенности магнитоожижения дисперсных систем/ М.К. Болога, С.В. Сюткин// Магнитная гидродинамика. – 1981. - №4. – с.3-4.

2. Способ магнитной сепарации. Ю.М. Вернигоров, Н.С. Биткина, Ю.А. Гордин, С.И. Егорова, Г.Ф. Лемешко. АС168.0331 СССР МКИЗ В ОЗС 1/90 №4621006/03, Заявл. 15.12.88; Опубл. 30.09.91. Бюл. №36.

3. Вернигоров Ю.М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов: Дис. док. тех. наук./ Ю.М. Вернигоров Ростов н/Д, 1995. – с.69.

4. Плотников Д.М. Повышение качества изделий из порошковых материалов за счет использования магнитовибрационной технологии сепарации шлифовальных шламов подшипникового производства. Автореферат дис. к.т.н., Новочеркасск 2009.

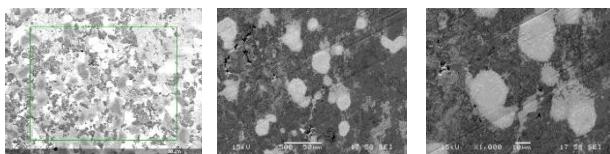
### **3D AFM ROUGHNESS OF SINTERED NANOMATERIALS PRODUCED BY HOT ISOSTATIC PRESSING (HIP)**

*T. Sayah<sup>1</sup>, K. Hamouda<sup>1</sup>*

Алжирский научно-технический университет, Алжир

We propose an experimental study of the surface to dry and analysis of the evolution parameters roughness. The simplified model was proposed to predict the metrological parameters in the contact area of deformed surface.

The hot isostatic pressing (HIP) is the only process that will develop fully dense samples, From Fe,Cr,Mo,Ni,Ti,W powder fig 1. The samples were analyzed by SEM, ABSD and optical microscopy.



*Figure 1: Microstructures of the studied alloys*

Study aims to characterize the topography of sintered materials obtained by wear tests.

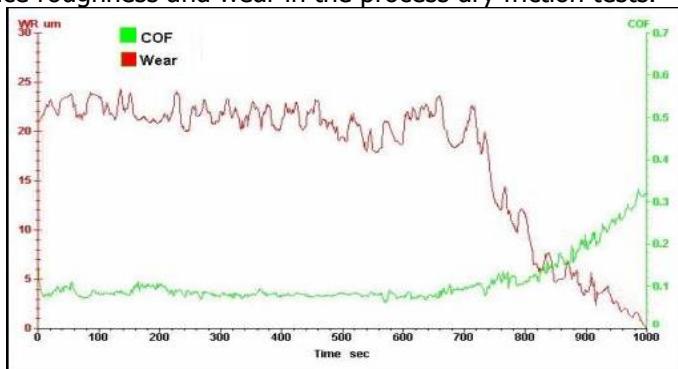
Therefore it is interesting initially in the evolution of wear for the loads applied fig 2 and to characterize the different roughness emerging from 3D AFM observations. The model is based on the analysis of the topography 3D of the deformed surface fig 3.

The essential differences in surface topography of samples loaded in dry condition are confirmed in the analysis of roughness parameter evolution fig 4. The following 3D parameters were considered [1]: In the unloaded state, flattened asperities can be observed on the deformed surface Fig 3.

The identification of the real contact area was carried out using a special algorithm based on single profile analysis. It should be noted that the profiles obtained in this way have a common reference level Fig 4.

The proposed model was applied to analyze a wear of four kinds of rough surfaces. The predicted values were compared with experimental results Table 1. The wear and surface roughness based on the parameters of dry friction tests were measured [2] [3].

This study suggested the optimal parameters of chemical composition, and analysis of the effects of alloying elements on surface roughness and wear in the process dry friction tests.



*Figure 2: measurement 3D topography friction*

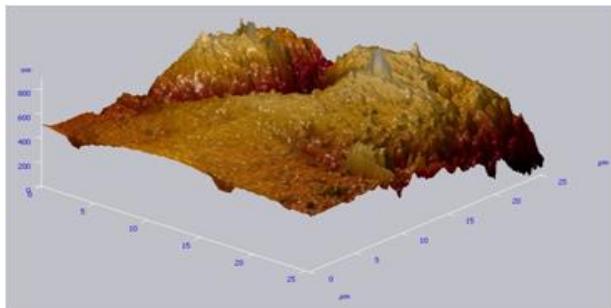


Figure 3: measurement 3D topography friction

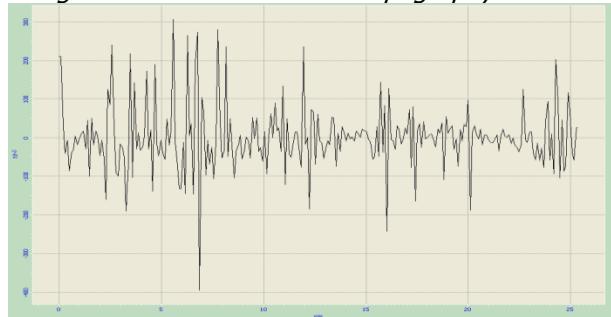


Figure 4: Profile corresponding to real area

Table1. Roughness parameters of the deformed surfaces

Max	Min	Peak-to-peak, Ry	Ten point height, Rz
577,339 nm	430,073 nm	147,266 nm	506,714 nm
Average	Average Roughness, Ra	Root mean square, Rq	Dispersion
510,674 nm	28,7048 nm	511,831	34,3946 nm
Surface skewness, Rsk	Coefficient of kurtosis, Rha	Entropy	Redundance
-0,157453	-0,696865	7,88768	-0,0936811
-0,157453	-0,696865	7,88768	-0,0936811

---

[1] A. Bartoszewicz, J. Radziejewska and G. Starzyński, *3D roughness analysis of deformation of surface at contact loading*, Adv Manuf Sci Technol 4 (2004), 28, pp. 17–30

[2] Hibi, Y., Miyake, K., Murakami, T., Sasaki, *Tribological behavior of SiC-reinforced Ti3SiC2-based composites under dry condition and under lubricated condition with water and ethanol*, J. Am. Ceram. Soc 9 (2006), 89, pp. 2983–2985

[3] Zhang J J, Zhu J H. *Surface structure evolution and abnormal wear behavior of the TiNiNb alloy under impact load*, Metall Mater Trans A (2009), 40, pp. 1126–1130

## **II. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАТЕРИАЛАХ И СРЕДАХ.**

**УДК 621.74**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВИБРОУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ВИБРОПРЕССЕ**

*Искович-Лотоцкий Р.Д., Миськов В.П.*

ВНТУ, г. Винница, Украина

Использование полезных вибраций в таких технологических процессах как вытягивание, прессование, трамбовка подтвердило свою эффективность по сравнению с обычными методами, что связано с увеличение производительности, улучшением качества выпускаемой продукции, использованием менее мощного оборудования и др. Однако, за счет развития новых технологий и совершенствования известных методов для создания вибраций, существующее вибрационное оборудование морально устаревает, что требует его модернизации и полною автоматизацию за счет компьютеризации. Одним из таких вопросов занимаются ученые кафедры МРВОАВ Винницкого национального технического университета.

Как известно вибрационное оборудование делится путем использования привода, которое заставляет вибрировать исполнительное звено и разделяется на следующие группы: электрический, пневматический, гидравлический и комбинированный. Каждый из приводов имеет ряд преимуществ и недостатков по сравнению с другими. Однако за счет развития новых технологий все большее применение приобретают комбинированные вибровозбудители. Применяя современные методы автоматизации, путем компьютерного программирования работы исполнительных узлов вибрационного оборудования, мы расширяем его возможности.

Именно поэтому мы предлагаем использовать принцип работы вибрационных машин с гидроимпульсным приводом (ГИП) в сочетании с электрическим управлением распределительных элементов за счет использования программного обеспечения. Генерирование вибраций в ГИП

происходит путем применения генератора импульсов давления (ГИТ), в основе которого лежит принцип параметрического налаживания распределителя потока жидкости. При достижении в гидравлической линии давления Р1 золотник переключается и жидкость перетекает через ГИТ в исполнительный орган, а при падении давления в гидравлической линии до значения Р2 золотник возвращается в исходное положение, после чего цикл повторялся. Такое налаживание происходит путем регулирования усилия упругих элементов, что трудно сделать во время работы оборудования. В зависимости от вида нагрузки, которое необходимо получить на исполнительном органе, ГИТ устанавливают «на входе» или «на выходе».

Используя принцип генерирования гидравлических вибраций и заменив гидравлическое переключение золотника на управляемое электромагнитное, присоединив его к специальному блоку управления, получаем гидропривод с электрогидравлическим управлением. Сочетание обоих приводов, позволяет создать большое усилие на исполнительной звене и облегчить процесс управления.

Производительность и рабочие характеристики данной системы зависят, в основном, от рабочих параметров электрогидравлического клапана, а именно от пропускной способности клапана, мощности и его быстродействия срабатывания, как электрической так и гидравлической частей.

Для проведения исследований адекватности работы такого комплекса, в качестве экспериментального стенда использованы вибропресс-молот на базе ИВПМ-16 гидрокинематическая схема которого приведена на рис. 1, технические характеристики стенда наведении в табл. 1, которые в полной мере позволяют проверить работоспособность многокомпонентного вибруударного нагружения.

Использование многокомпонентного нагружки по сравнению с однокомпонентным доказано экспериментально, что связано с направлением распространением полезных вибраций и их проникновением в соответствующей среде. Многокомпонентное вибруударное нагружение целесообразно использовать во время прессования заготовок сложной формы, что обеспечивает равномерное распределение материала и прессования во всех

направлениях, что повышает однородность и плотность заготовки во всех направлениях по все его поверхности.

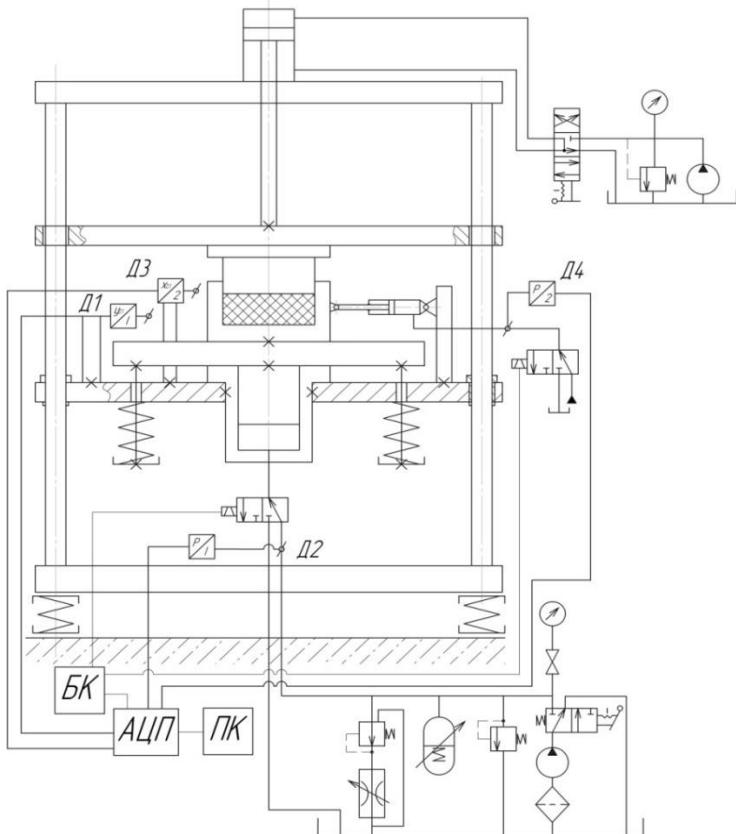


Рис. 1. Гидрокинематична схема вибропресс-млota с электрогидравлическим управлением, где БК - блок управления; АЦП - аналогово цифровой преобразователь; ПК-персональный компьютер; Д1, Д3 - датчики перемещения; Д2, Д4 - датчики давления.

Также многокомпонентное нагружение эффективно использовать во время вытягивания длинных тонкостенных заготовок. В результате чего происходит нормализация и уплотнения структуры заготовки, что уменьшает вероятность возникновения трещин и разрывов во время вытягивания.

Таблица 1

Технические характеристики вибропресс-молота с  
электрогидравлическим управлением на базе ИВПМ-16

Наименование параметра и его размерность	Числовая величина параметра
Максимальные рабочие давления в гидросистемах, МПа: - вертикального гидроцилиндра: - горизонтального цилиндра: - подвижной траверсы:	14 6,3 6,3
Максимальные усилия развивающихся предлогами, Н: - вертикального гидроцилиндра: - горизонтального цилиндра: - подвижной траверсы:	$23 \cdot 10^4$ $2,7 \cdot 10^4$ $5 \cdot 10^4$
Подачи насосов поводов, м <sup>3</sup> /с: - вертикального гидроцилиндра: - горизонтального цилиндра: - подвижной траверсы:	$1,1 \cdot 10^{-3}$ $0,4 \cdot 10^{-3}$ $0,32 \cdot 10^{-3}$
Мощности электродвигателей насосов приводов, кВт: - вертикального гидроцилиндра: - горизонтального цилиндра: - подвижной траверсы:	18,5 4,5 3,3

Такая эффективность многокомпонентного нагружения перед однокомпонентным проявляется в том, что во время однокомпонентного нагружения прессования заготовки происходит только со стороны действия вибраций, в случае заготовок с большими объемами приближает производительность вибрационного прессования к обычному, поэтому для расширения возможностей однокомпонентного нагружки процесс вибропрессования проводят с нижним направлением распространения вибраций, поскольку такой метод обеспечивает прессования (уплотнения) материала с обеих сторон по оси направления вибраций.

Получить лучшие результаты при многокомпонентной нагрузке возможно путем одновременного или переменного по времени нагрузки на заготовку вибраций по разным осям.

Процессы возбуждения вибраций на каждом из приводов стенда, происходят за счет перемещения золотника электрогидравлического клапана УЭГ.С-200, управление которым осуществляется с блока управления, который в свою очередь присоединен к персональному компьютеру ПК. К ПК также поступают данные со всех датчиков перемещения и давления, которые трансформируются в соответствующие графики, что наглядно позволяет оценить процессы и параметры нагрузки проходящие в приводах. Используя унифицированное оборудование и переходную плиту мы реализуем все возможности вибрационного стенда без дополнительных конструктивных изменений. Подключение УЭГ.С-200 к ИВПМ-16 происходит за счет использования переходной платы, что значительно упрощает поиск другого распределительного оборудования и расширяет возможности применения вибропресс-молота.

Используя специальный блок управления БК, мы имеем возможность отдельно настраивать параметрами каждого из распределительных электрогидравлических клапанов, а именно время открытия закрытия клапана, скважностью и взаимным срабатыванием. Такой подход повышает эффективность многокомпонентного нагрузки и позволяет расширить возможности его применения.

Результатом исследования многокомпонентного виброударного нагружения является конечный продукт - обработанная заготовка. А также получение данные, по перемещению и изменению давления в исполнительных цилиндрах. Они позволяют проанализировать процесс нагрузки в определенный период времени и сделать соответствующие выводы, по окончательной качестве заготовки. Что в дальнейшем позволит подобрать необходимый режим нагрузки, для эффективной обработки заготовки.

---

1. Искович-Лотоцкий Р.Д. / Процессы и машины вибрационных и виброударных технологий. Монография. / / Искович-Лотоцкий Р.Д., Обертох Р.Р., Севостьянов И.В. - Винница: Универсум-Винница, 2006 -291 с.

2. Искович-Лотоцкий Р.Д. / Основы теории расчета процессов и оборудования для виброударного прессования. Монография. - М.: Универсум - Винница, 2006. - 338 с.
3. Баранов В.Н. / Электрогидравлические и гидравлические вибрационные машины / Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. - М.: Машиностроение, 1977. - 326с.
4. Яссе Э.. / Электромагниты - Москва: Энергоиздат, 1934. - 192с.
5. Гордон А.В. / Электромагниты постоянного тока / / Гордон А.В., Сливинская Я.Г. - Москва: Госэнергоиздат, 1960. - 447с.

**УДК 621.923**

## **РОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Клименко В.Г., Рязанова-Хитровская  
Н.В.*

Харьков, Полтава, Украина

Исследования, выполненные ранее [1, 3, 4, 5], позволили выявить важную физическую особенность процесса шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ), заключающуюся в периодичности изменения значений выходных показателей обработки. Это явление характерно как для комбинированных [3], так и обычных процессов шлифования [4, 5] причем как кругами на металлических, так и органических связках. Периодичность процесса обработки свидетельствует о недостаточно полном использовании режущего ресурса алмазного круга. Ее устранение путем соответствующего подбора величины скорости принудительного удаления связки круга [3] не позволяет достаточно эффективно решить эту задачу, т.к. значительное число зерен выпадает из связки. Исследования по шлифованию ПСТМ предварительно вскрытым кругом, когда практически все зерна на его рабочей поверхности имеют острые микро - и субмикрокромки, показывают [1, 2], что в начальный момент времени ( $T=5-10$  с.) реализуется очень высокая производительность (например, для алмаза  $Q=15-30$  мм/мин и более). Примечательно, что чем больше концентрация (в диапазоне  $K=25-150\%$ ), тем выше начальное значение  $Q$ . Следовательно, путь, направленный на обеспечение возможности непрерывного самозатачивания зерен круга, имеющих концентрацию  $K=100-150\%$ , при одновременном

увеличении их числа в контакте с ПСТМ, является достаточно перспективным, поскольку это должно существенно повысить производительность шлифования при высоком коэффициенте использования режущего ресурса алмазных зерен [6].

Целью настоящей работы является изыскание возможности наиболее полного использования режущего ресурса алмазных зерен круга за счет наложения в зону обработки низкочастотных колебаний.

На рисунке 1 показана схема приложения постоянной и дополнительной нагрузок в зону шлифования [6]. Вначале в течение времени  $\tau_1$  производят шлифование с постоянным давлением в контакте  $P_{\text{пост.}}$ , затем с некоторым ударом прикладывают дополнительную нагрузку  $P_{\text{доп.}}$ , создавая таким образом давление в контакте  $P_{\text{н.уд.}}$ , после чего в течение времени  $\tau_2$  осуществляют обработку с суммарным давлением в контакте  $P_{\text{н.сум.}}$ , которое вызвано совместным действием постоянной и дополнительной нагрузок. По истечении времени дополнительную нагрузку снимают, и процесс повторяют вновь. Частота изменения давления в зоне контакта ПСТМ с рабочей поверхностью круга не превышала 10 Гц, что дает возможность достаточно просто реализовать этот процесс с помощью механических устройств. Схема комбинированного способа шлифования ПСТМ представлена на рисунке 2.

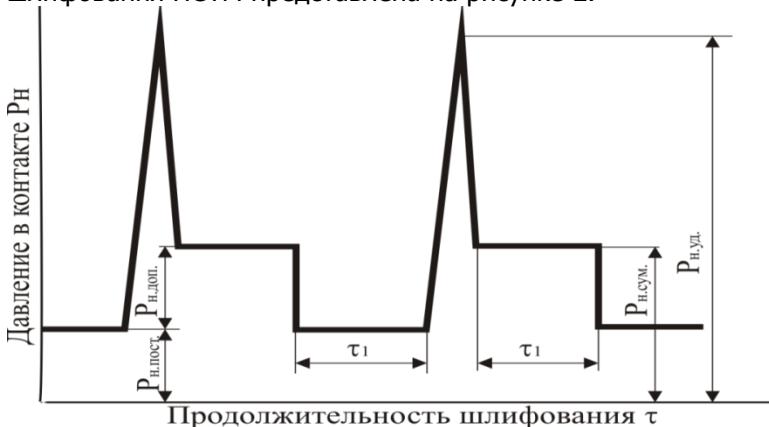


Рисунок 1-Схема изменения давления в зоне обработки ПСТМ

Постоянное давление в зоне контакта обрабатываемого ПСТМ 3 с рабочей поверхностью алмазного круга 1 осуществляется с помощью груза 6 через плунжеры 4 и 5. Дополнительный груз 7 (создающий дополнительное давление Рн.доп..), установленный на направляющих качения, перемещается в верхнее положение с помощью специального кулачка 8, который приводится во вращение электродвигателем 10 через редуктор 9. Профиль кулачка выполнен таким образом, что перемещение груза 7 вниз осуществляется путем его практически свободного падения. Во время подъема груза 7 обрабатываемый ПСТМ подвергается обработке при величине давления в контакте Рн.пост. в течение времени ·1 (рис. 1). Однако как только штанга толкателя выйдет из контакта с кулачком 8, начинается перемещение груза 7 с ускорением, близким к ускорению свободного падения, в результате чего он ударяет по грузу 6, что создает определенную величину мгновенного (ударного) давления в контакте Рн.уд. Затем в течение времени ·2 шлифование осуществляется с суммарным давлением Рн.сум., которое обеспечивается одновременным действием грузов 6 и 7. После этого вновь производится подъем груза 7 и процесс повторяется.

Установлены рациональные условия обработки при использовании такого процесса. Для общих условий обработки (круг 12A2-45° 150x10x3x32 АС6 М2-01;  $V_k=20-30$  м/с;  $S_{пр}=1$  м/мин;  $Rn.пост=1,3-2,5$  МПа;  $S_k=37$  мм) эти параметры имеют следующие значения:  $R_{доп.}=50-60$  Н ( $R_{н.доп.}=1,5-2,0$  МПа);  $A=5-6$  мм;  $f=10$  Гц;  $I=180-200$  А;  $Z=160/125-200/160$ ;  $K=100-150\%$ .

Эти условия позволяют по сравнению с таким же процессом, но без наложения переменной нагрузки до десяти раз снизить удельный расход алмазов круга и до пяти раз повысить производительность обработки. Эти результаты убедительно подтверждают тот факт, что приложение в зону резания ударной нагрузки обеспечивает непрерывное самозатачивание

алмазных зерен круга, причем при малых высотах последних над уровнем связки круга. А это обеспечивает участие в работе значительно большего количества алмазных зерен, которые в обычном способе выпадали из связки и не в полной мере использовали свой ресурс.

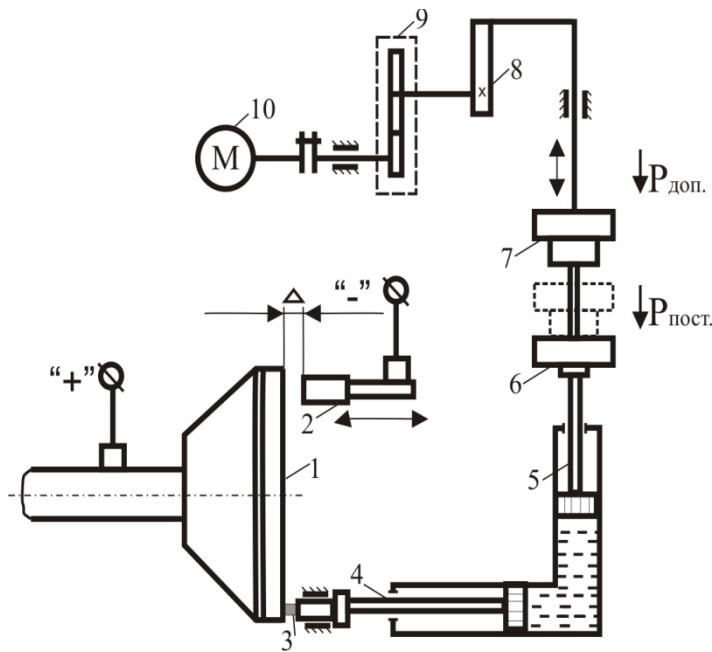


Рисунок 2 – Схема комбінованого способа шлифування ПСТМ

---

1. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А.И. Грабченко/ - Харьков: Вища школа, 1985. - 184 с. 2. Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, М.Г. Ходоревский. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. 3. Грабченко А.И. Повышение производительности шлифования ПСТМ с управлением режущим рельефом круга / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов // Сверхтвердые материалы. - 1982. - № 5. - С. 34-37. 4. Грабченко А.И. Повышение эффективности алмазного шлифования поликристаллических СТМ в режиме самозатачивания / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов // Сверхтвердые материалы. - 1983. - № 5. - С. 34-38. 5. Грабченко А.И. Особенности контактного взаимодействия алмазных кругов с СТМ при шлифовании / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов // Контактные процессы при больших пластических деформациях. - Харьков: Вища школа, 1982. - С. 33-37. 6. А.с. № 831483 СССР. Способ ультразвуковой электроалмазной обработки / Моисеенко Г.Н. – Опубл. в Б.И. 1981, № 19. 6. Грабченко А.И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Д.М. Алексеенко. -Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки», №1, т.1, 2011.-С. 105-116.

**УДК 669.018.95:621.165**

**ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ  
АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО  
МЕХАНО-ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Варавка В.Н., Кудряков О.В., Моисеева И.В.*

*ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Рассмотрим эрозионный процесс деградации поверхности металла при циклическом жидкокапельном ударном воздействии. Эта ситуация весьма актуальна в теплоэнергетике при эксплуатации мощных паровых турбин, где каплеударная эрозия последних ступеней лопаточного аппарата, работающего в условиях конденсации оставшегося пара, существенно сокращает срок службы всей турбины. Специфичность процесса выражается в том, что, с одной стороны, длительное механо-физическое ударное воздействие капель жидкости провоцирует в металле явление многоцикловой усталости. А с другой, каждое единичное соударение по характеру распределения нагрузок в зоне контакта является волновым процессом, при этом механизм износа поверхности металла и потери им эксплуатационных свойств определяется, главным образом, состоянием поверхности.

Выполненные нами испытания на каплеударную эрозию проводились на специализированном стенде НИУ-МЭИ "Эрозия-М", у которого вертикальный монодисперсный водно-капельный поток (радиус капель  $R_0=0,01\ldots0,6$  мм) разбивается поверхностью металлического образца, движущегося (вращающегося) в горизонтальной плоскости с линейной скоростью  $V_0=150\ldots613$  м/с. В экспериментах использовались образцы аустенитной стали 08Х18Н10Т.

При соударении капли с плоской поверхностью образца формируется отраженная ударная волна. Начальный момент такого соударения с его основными параметрами – размером капли  $R_0$ , скоростью удара  $V_0$  и скоростью ударной волны  $D$ , примыкающей к пятну контакта и ограничивающей область сжатия жидкости, – показаны на рисунке 1 а. В дальнейшем взаимодействие ударной волны  $D$  со свободной поверхностью капли приводит к развитию процесса гидродинамической кавитации в объеме капли с последовательным формированием

и схлопыванием двух кавитационных полостей – торOIDальной (по периферии капли) и осевой (расположенной по диаметру капли, перпендикулярному поверхности металла) [1]. Гидродинамические удары, сопровождающие схлопывание кавитационных полостей, генерируют два пика [2] в периодической функции давления на поверхности контакта капли и мишени  $P = f(t)$ , проиллюстрированной на рисунке 1 б в форме выражения:

$$P = \rho_0 \cdot c_0 \cdot V_0 \cdot \frac{\sin(\sqrt{2\pi} \cdot t) + \alpha}{\sqrt{2\pi} \cdot (t + t^{-1})}, \quad (1)$$

где  $c_0 = \sqrt{\frac{B \cdot \gamma}{\rho_0}}$  – скорость звука в жидкости при нормальных условиях, м/с;

$\rho_0 = 10^3$  кГ/м<sup>3</sup> – плотность невозмущенной жидкости; значения констант для воды при температуре 20...60°C полагают:  $B=3,214 \cdot 10^8$  Па,  $\gamma=7$ ,  $\alpha=1,8$ ;

$$t = \omega \tau = \frac{\pi \cdot V_0}{R_0} \cdot \tau \text{ - безразмерное время, максимальное}$$

значение ( $2\pi$ ) которого соответствует физическому времени  $\tau$  одного соударения и определяет период  $T=2\pi/\omega$  затухающей функции  $P(t)$ .

Гидродинамика соударения капли с поверхностью металла, имеющей рельеф, отличается от описанной выше гидродинамики соударения с плоской ровной поверхностью. Поверхностный рельеф, формировавшийся на стадии развитой каплеударной эрозии, представляет собой совокупность более или менее плотно распределенных по поверхности образца впадин (кратеров, каверн) конической или цилиндрической формы. При вращении стендового образца этот рельеф заполнен водой (эродентом), которая прижата к поверхности и не может покинуть впадины рельефа. Поэтому капля, попадая на эрозионный рельеф, соударяется не с металлической поверхностью, как на начальной стадии эрозии, а с поверхностью воды, заполняющей кратеры. На схеме такого соударения, представленной на рисунке 2 а, эрозионный кратер имеет цилиндрическую форму.

При ударе капли о поверхность воды (рисунок 2а) возникают две ударные волны: отраженная  $D_1$  и индуцированная  $D_2$ , направленные в разные стороны от водной поверхности кратера. При этом для скоростей соударения  $V_0 < 1,2 \cdot c_0$  скорость ударной волны аппроксимируется линейной функцией  $D = c_0 + k V_0$ , где аппроксимационный множитель  $k$  для отраженной волны ( $D$  и  $D_1$ ) составляет  $k \approx 2$ , а для индуцированной ( $D_2$ ) –  $k \approx 3$ . Характер изменения давления на стенку эрозионного кратера в этом случае описывается кривой, представленной на рисунке 2 б.

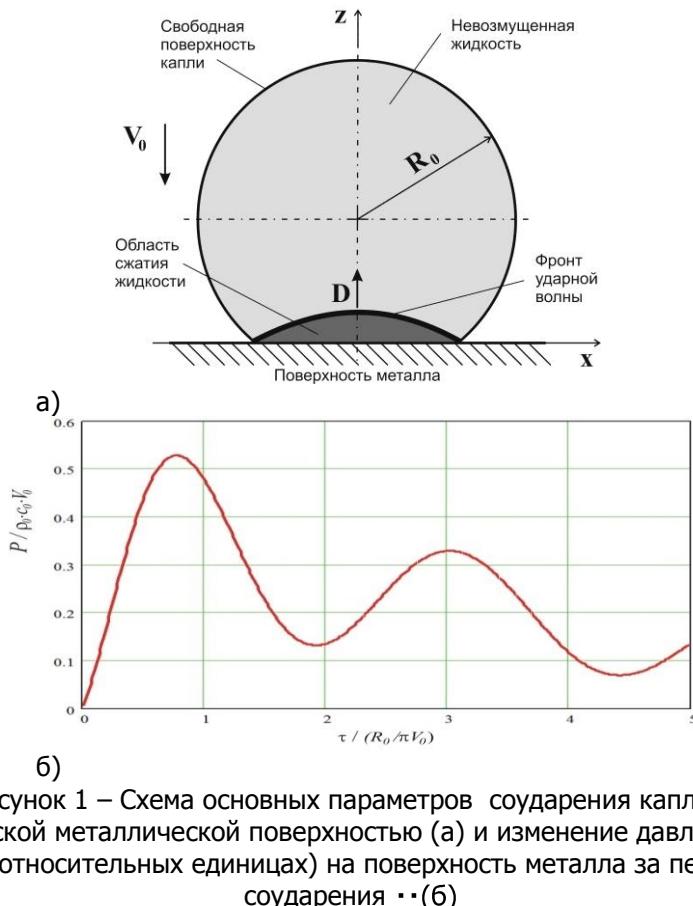
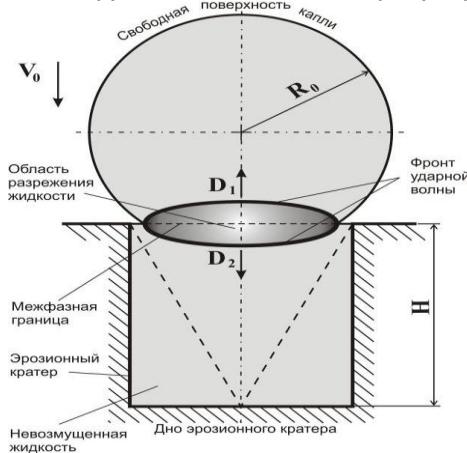
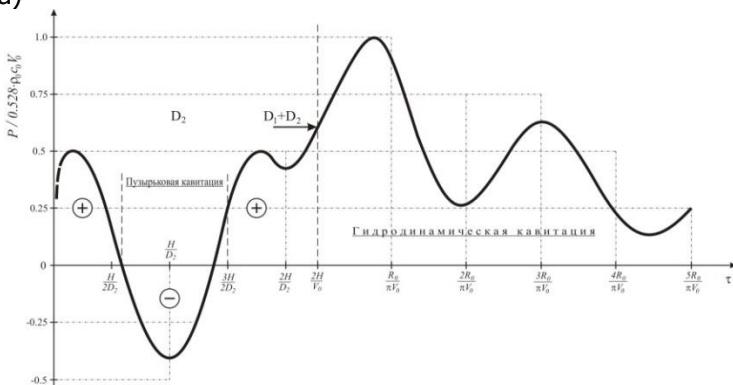


Рисунок 1 – Схема основных параметров соударения капли с плоской металлической поверхностью (а) и изменение давления  $P$  (в относительных единицах) на поверхность металла за период соударения ..(б)

Благодаря разнице значений множителей  $k$  индуцированная волна  $D_2$  после отражения от дна кратера догонит волну  $D_1$  в момент времени  $\tau_0 = 2H / V_0$ , где  $H$  – физическая глубина кратера. На рисунке 2 б этот момент отмечен как слияние ударных волн  $D_1+D_2$ , после которого характер изменения функции  $P$  аналогичен рисунку 1 б.



а)



б)

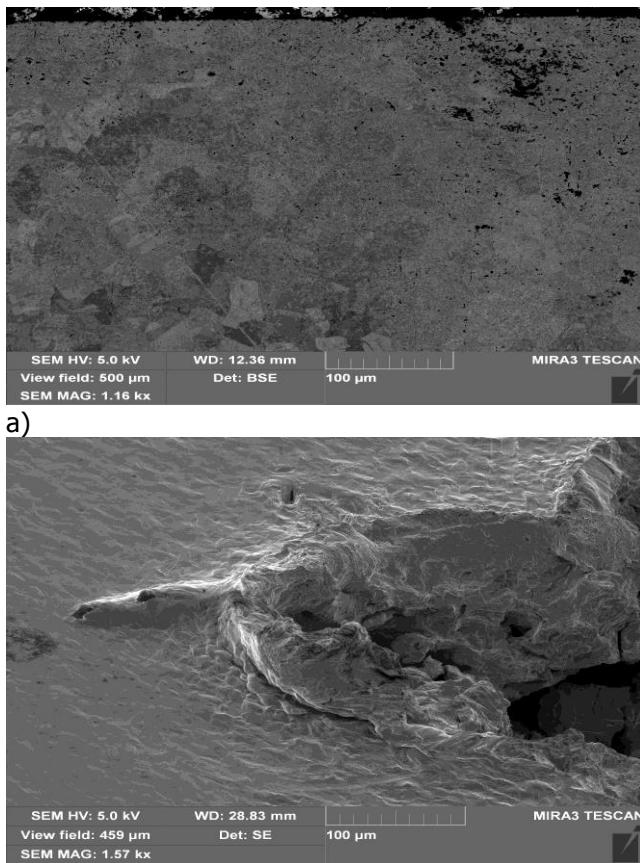
Рисунок 1 – Схема параметров соударения капли с поверхностью эрозионного кратера, заполненного водой (а), и изменение давления Р (в относительных единицах) на боковой (цилиндрической) поверхности кратера на глубине  $\sim 0,1 \cdot H$  за полное время соударения... (б)

Наиболее важным следствием из представленных на рисунках 16 и 26 зависимостей является то, что образование зоны разрежения (зоны с отрицательным давлением между расходящимися волнами  $D_1$  и  $D_2$ ) в кратере создает условия для возникновения пузырьковой кавитации, тогда как при соударении капли с твердой плоской металлической поверхностью таких условий не возникает (давление остается положительным) и кавитация носит гидродинамический характер. Причем, зона разрежения существует только для верхней части стенки кратера, соответствующей глубинам не более 0,586 ·  $H$ .

Развитие эрозионного процесса под влиянием пузырьковой кавитации обусловлено ударным действием схлопывающихся кавитационных пузырьков на стенки эрозионного кратера. Расчеты показывают, что давление сферической ударной волны, возникающей при схлопывании кавитационного пузырька вблизи стенки кратера, может превышать в несколько раз предел прочности стали. Это объясняет наличие на стенах кратеров многочисленных каверн (ямок, выбоин, прострелов), имеющих глобуллярную форму с диаметром 2...45 мкм, которые обнаруживаются при электронно-микроскопическом исследование образцов после стендовых эрозионных испытаний.

К другим феноменологическим особенностям процесса деградации поверхности аустенитной стали в условиях каплеударного воздействия следует отнести формирование усталостной пористости на этапе соударений капель с плоской поверхностью образца (рисунок 3 а) и образование подповерхностных свищевых каналов на этапе соударений капель с поверхностью, имеющей развитый эрозионный рельеф (рисунок 3 б). Усталостная пористость формируется в пластичном аустените на начальной стадии эрозии по принципу перколяции [3] и является зародышем эрозионных кратеров износа. Свищевые каналы образуются на стадии развитой каплеударной эрозии, начинаясь на стенах кратеров рельефа и выходя на поверхность в стороне от кратера (рисунок 3 б). Механизм образования каналов также имеет усталостный характер и развивается под действием многоцикловых воздействий сферических ударных волн, возникающих при

схлопывании кавитационных пузырьков сначала на поверхности кратера, а затем внутри канала. Характерным для пузырьковой кавитации в рассматриваемых условиях является автокаталитичность процесса, когда схлопывание пузырька, достигшего критического размера, ведет к появлению зародышей новых пузырьков.



б)

Рисунок 3 – Подповерхностная пористость в поперечном сечении зоны капельных соударений образца стали 08Х18Н10Т (а) и выходы эрозионных свищевых каналов на поверхность образца (в левой части фото - б

---

1. Haller K.K., Ventikos Y., Poulikakos D., Monkewitz P. Computational study of High-speed liquid droplet impact // Journal of Applied Physics. 2002. V.92. №5. P.2821-2828.

2. Чижов А.В., Шмидт А.А. Высокоскоростной удар капли о препаратор // Журнал технической физики, 2000, т.70, вып.12. С.18-26.

3. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.2. Деформация. - М.: МИСиС, 1997. -527с.

## **УДК 532.59; 532.595**

### **ЭЛЕКТРОГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСТАЛИВАНИЕ ПРИ ИНФРАЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ВОССТАНАВЛИВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

*Копылов Ю.Р., Горожанкина О.В.*

ВГТУ, Воронеж, Россия

Перспективными для восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов могут быть гальвано-механические покрытия на основе железа. [1-4]. Отличительной особенностью гальвано-механического осаждения является то, что в процессе электролиза покрываемая поверхность подвергается механическому активированию (выглаживанию) инструментом, который перемещается в межэлектродном пространстве (рис. 1). В настоящее время процесс гальвано-механического остиливания является малоизученным, в связи с чем возникает необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

Окружная скорость вращения образца 20 см/с, частота выглаживания восстановленной поверхности инструментом составляет 0,5-1,0 Гц.

Разработанная технология гальвано-механического остиливания [2, 3] обеспечивает следующие результаты. Толщина восстановленного слоя на сторону – 1,0-1,5 мм; твердость – HV 730 ·27 при исходной твердости HV 230 12; прочность сцепления не более 200-250 МПа; снижается наводораживание (0,01-0,008 %) и пористость (0,01-0,03 %); формируются сжимающие остаточные напряжения 150-320 МПа.

Электролитические покрытия при механической активации, отличаются повышенной микротвердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, их нанесение протекает с

повышенной скоростью. Недостаточная стабильность процесса требует дополнительных исследований.

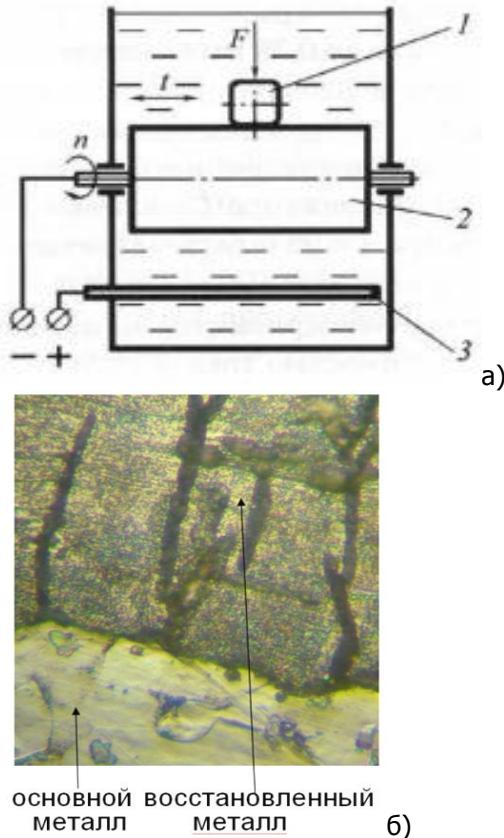


Рис. 1. Схема процесса гальваномеханического осаждения (а) и структура основного и восстановленного металла (б): 1 – выглаживающий инструмент; 2 – деталь-катод; 3 – анод;  $t$  – период двойного хода;  $F$  – сила прижатия инструмента к восстановленной поверхности (увеличение 1600)

Осталивание осуществляли в хлористом электролите [1-4], содержащем хлористое железо. Покрытия получали методом гальвано-механического осталивания, при совместном

электролитическом осаждении и механической активации осаждаемого слоя нетокопроводящей пластины. Покрытия наносили на образцы из стали 30. Гальвано-механическое остиливание осуществляли согласно ранее выполненным исследованиям [1, 2]. Проводились исследования химического состава в основном материале и в восстановленном слое. Содержание в основном металле углерода составило 0,223 %, водорода – 0,0042 %, серы - 0,0088 %. В восстановленном слое содержание углерода составило 0,086 %, что в несколько раз меньше, чем в основном металле, водорода – 0,0043 %, серы – 0,0021 %.

Микротвердость восстановленного слоя составила 620–750 HV, что в два – три раза выше твердости исходного материала (230 HV) и в несколько раз выше твердости стали, с содержанием углерода 0,086 %, полученной обычным способом из расплава.

Микроструктуру покрытий изучали на образцах-шлифах, используя микроскоп Альтами МЕТ 1С. Особенности структуры и строения осадков выявляли химической обработкой образцов-шлифов растворами для травления (4% раствор  $\text{HNO}_3$  в спирте). Расчеты проводили по полученным фотографиям микроструктуры математическими методами.

Микроструктура покрытий исследуется с увеличением до 1600 раз. Металлографическими исследованиями выявлено, что изменение плотности тока существенно влияет на формирование структуры осадка, которая изменяется от слоистой до мелкозернистой. В соответствии с известными теориями кристаллизации [7-11] образование слоистых гальванических покрытий в хлористых, сульфатных и других электролитах обусловлено включением гидроокисей рН гидратообразования, особенно при наличии трехвалентного железа.

Слоистая структура электролитических сплавов возникает вследствие чередующегося обеднения прикатодного слоя ионами более электроположительного компонента, в результате чего достигается потенциал выделения более электроотрицательного компонента с одновременным диффузионным выравниванием концентрации ионов металла. С ростом плотности тока, вследствие усиления адсорбции органических соединений и концентрационных ограничений по

ионам металлов на катоде периодически формируются слои с большим содержанием гидроокисей. На их поверхности образуются слои поликристаллов с металлической структурой и значительно меньшим содержанием гидроокисей.

О циклическом характере процесса кристаллизации можно судить по выявленным характерным участкам (полосам) при химической обработке шлифов-образцов травителем 4% азотной кислоты в спирте. Наличие слоистости негативно сказывается в процессе эксплуатации электролитических покрытий, так как изменения структуры по толщине ухудшают некоторые характеристики осадков, в частности, защитные.

Можно предположить, что при применении механического воздействия (активации) при электроосаждении, толщина полученных слоев будет возрастать, так как выглаживающий инструмент периодически действует на поверхность и удаляет окислы, способствует перемешиванию электролита у катода, очищению прикатодного слоя от гидроокисей. Дисперсность структуры электролитических покрытий зависит от природы осаждаемого металла и условий электролиза и определяется соотношением скоростей зарождения и роста кристаллитов. В тех случаях, когда скорость образования зародышей превалирует над скоростью их роста, на катоде формируются мелкокристаллические или ультрадисперсные осадки.

Согласно электрохимическим и структурным критериям все металлы, осаждаемые из водных растворов простых солей подразделяются на три группы. Железо (Fe) относится к первой из них, характеризующейся высокой величиной перенапряжения катода (более 0,1 В) и мелкозернистой структурой покрытий

(менее  $10^{-4}$  см). Электроосаждение металлов первой группы происходит с высоким перенапряжением катода и в условиях выделения на катоде водорода, причем доля его может быть очень велика (до 85 %). Выделение водорода способствует активизации катода за счет десорбции ионородных атомов и молекул с его поверхности. При этом увеличивается число активных центров зарождения кристаллитов и повышается вероятность зародыше образования. В дальнейшем выделяющийся водород адсорбируется на зародышах и препятствует их нормальному росту. Совокупность этих

факторов обуславливает мелко-кристаллическую структуру осадка.

Механическая активация также вносит свой вклад в получение мелкозернистых осадков: возможно, что удаление инородных атомов при активации выглаживающим инструментом идет более активно и число активных центров зарождения кристаллов увеличивается.

Полученные гальвано-механическим способом толстослойные покрытия имеют поры как связанные, так и не связанные между собой. Это видно на фотографиях структуры, полученных с радиального и поперечного радиальному срезов покрытия (рис. 2, 3). Такие дефекты относятся к макроскопическим.

Прослеживается закономерность роста расстояния между размерами пор и области их расположения. У подложки расстояние между порами наименьшее, в области края восстановленного слоя – наибольшее (рис. 3). Длина пор также меняется: у подложки длина наименьшая, у края – наибольшая. Ширина поры меняется мало, практически постоянная.

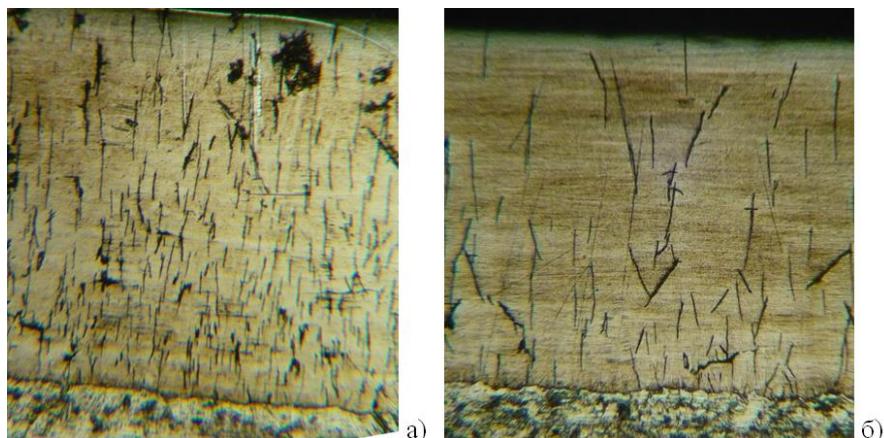


Рис. 2. Структура основного и восстановленного металла в радиальном срезе (а) и в торцевом срезе (б) увеличение 200

Абсолютные значения размеров микропор, по предварительной оценке, имеют следующие значения. Ширина пор от 1,0 до 2,5 мкм, длина пор 30-50 мкм; длина пор от 20 до

90 мкм. Процентный показатель пористости составляет (0,01-0,03 %). Эти исследования являются предварительными, так как получены при увеличении 1600 раз, нуждаются в более тонком рентгеноскопическом изучении.

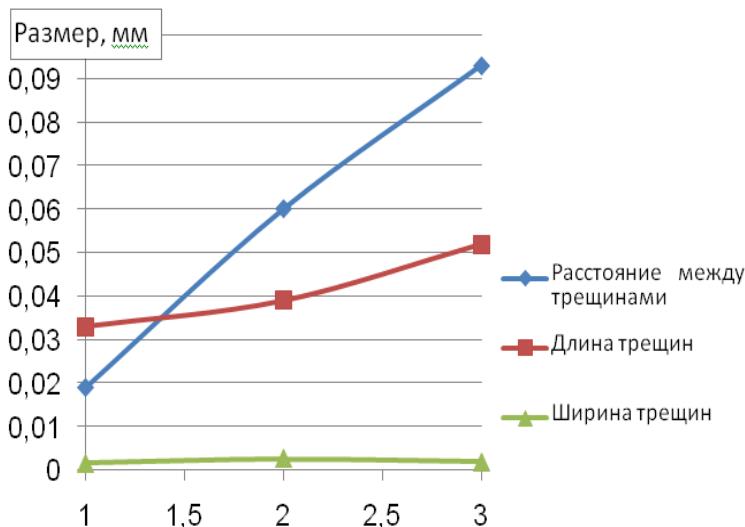


Рис. 3. Зависимость размера трещин от области расположения: 1 – область, прилегающая к подложке; 2 – средняя область восстановленного слоя; 3 – область края восстановленного слоя

1. Плешка Е.Д. Эффективность восстановления деталей в электролите повышенной стабильности //Межвуз. сб. научных статей «Прогрессивные способы восстановления изношенных деталей машин». Кишинев, СХИ, 1983.

2. Копылов Ю.Р. Применение гальвано-механического остиливания для ремонта крупногабаритных коленчатых валов. "Перспективные технологии и технические средства в АПК". Труды конфер. МичГАУ. 2007. С. 37-41

3. Толчеев А. В. Разработка технологии и установки для толсто-слойного восстановления деталей остиливанием / Автореф. дис. канд. техн.. наук. Воронеж, 2008. 25 стр.

4 Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. Изд. 4-е. М.: Высшая школа, 1984. 512 с.

**УДК 539.9**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ В СЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ  
КОНСТРУКЦИЯХ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЛНОВЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

*Мирошниченко И.П.*

ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия

В настоящее время интенсивное создание и повсеместное использование новых видов конструкционных материалов (композиционных, полимерных, слоистых и т.п.) и изделий приводит к наращиванию разработки новых методов и программного обеспечения (ПО) для проведения анализа их напряженно-деформированного состояния (НДС) для различных расчетных случаев на всех этапах их жизненного цикла (изготовление, контроль качества, эксплуатация).

В работе [1] предложен обобщенный метод скаляризации динамических упругих полей в трансверсально-изотропных (ТИ) средах, позволяющий описать динамические упругие поля перемещений, напряжений и деформаций в конструкциях, выполненных из ТИ материалов, при помощи трех скалярных потенциальных функций, соответствующих квазипродольным, квазипоперечным и поперечным волнам.

На основе тензорных соотношений метода [1] разработан научно-методический аппарат для определения НДС в слоистых цилиндрических и эллиптических конструкциях, выполненных из изотропных и ТИ композиционных материалов, учитывающий особенности всех типов волн, распространяющихся в данных материалах, волновых процессов в слоистых структурах и влияние кривизны поверхности рассматриваемых конструкций при заданном пространственно-временном распределении источников локального или распределенного импульсного воздействия по внешней и (или) внутренней поверхностям рассматриваемых конструкций. Предложены методики определения НДС в эллиптическом стержне, пространстве с эллиптической полостью и толстой эллиптической трубе для частных случаев двумерных задач. Рассмотрен общий случай возбуждения упругих волн в слоистых эллиптических конструкциях, выполненных из ТИ материалов [2,3].

Разработано оригинальное ПО [4-7], реализующее предлагаемый научно-методический аппарат [2,3], при этом предложено оригинальное ПО для вычисления функций Матье и модифицированных функций Матье, входящих в решения задач для эллиптических конструкций.

Предложено оригинальное ПО [8-9] для моделирования процессов диагностики состояния слоистых конструкций, выполненных из ТИ материалов, акустическими активными методами неразрушающего контроля при однократном или многократном воздействии зондирующих импульсов в форме функции Гаусса, локально-распределенном по внешней и внутренней поверхностям рассматриваемых конструкций.

Предлагаемое ПО успешно прошло апробацию при решении актуальных научных задач. Его разработка продолжается в интересах целого ряда прикладных производственных задач.

Полученные результаты наиболее целесообразно использовать при создании конструкций из новых анизотропных композиционных материалов, контроле качества их изготовления и диагностике состояния в процессе эксплуатации в машиностроении, авиастроении, судостроении и т.п.

Разработки частично поддержаны грантом РФФИ № 13-08-00754.

---

1. Сизов, В.П. О скаляризации динамических упругих полей в ТИ средах / В.П. Сизов // Известия АН. Механика твердого тела.- 1988.- № 5.- С. 55-58.

2. Мирошниченко, И.П. Возбуждение упругих волн в слоистых анизотропных конструкциях: монография / В.П. Сизов, И.П. Мирошниченко.- Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2012.- 270 с.

3. Miroshnichenko, I.P. Methods of Modeling of Stress-Strain Status in Layered Structures of Anisotropic Materials at Pulse Influences / I.P. Mirosh-nichenko // Advanced Materials. Physics, Mechanics and Applications Series: Springer Proceedings in Physics 152.- Springer International Publishing, Switzerland, 2014.- pp. 163-179.

4. Мирошниченко, И.П. Программа для расчета НДС в упругом полупространстве при импульсном воздействии по кольцевой области на его поверхности / А.М. Петров, И.П. Мирошниченко // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2013615307 РФ, 2013.

5. Мирошниченко, И.П. Программа для определения НДС в многослойной цилиндрической конструкции / И.П. Мирошниченко // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2014613314 РФ, 2014.

6. Мирошниченко, И.П. Программа для определения перемещений и напряжений в слоистой цилиндрической конструкции при комбинированном

импульсном воздействии / И.П. Мирошниченко // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2014613315 РФ, 2014.

7. Мирошниченко, И.П. Программа для определения перемещений и напряжений в слоистой цилиндрической конструкции при импульсном воздействии / И.П. Мирошниченко // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2014613316 РФ, 2014.

8. Мирошниченко, И.П. Программа для моделирования процесса диагностики состояния материала в монослоиной конструкции / И.П. Мирошниченко, И.А. Паринов // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2012661166 РФ, 2012.

9. Мирошниченко, И.П. Программа для моделирования процесса диагностики состояния материала в слоистой конструкции / И.П. Мирошниченко, И.А. Паринов // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2012661167 РФ, 2012.

## **УДК 621.762.04**

### **ОСОБЕННОСТИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО В НЕОДНОРОДНОМ ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СЛОЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ**

*Егорова С.И., Егоров Н.Я., Лемешко Г.Ф., Черный А.И.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия*

Порошки ферромагнитных материалов, используемые в промышленности, представляют собой полидисперсные системы. Обычно частицы ферромагнитных материалов не являются монокристаллами, т.е. состоят из множества мелких кристаллитов. Расположение отдельных кристаллитов можно изменять при механической или термической обработке. Если в поликристаллической частице распределение кристаллитов таково, что имеется преимущественное кристаллографическое направление, то существует доминирующее направление для намагниченности. При формировании изделия анизотропию можно создать, ориентируя отдельные частицы в направлении определенной кристаллографической оси. Однако, в тонкодисперсных порошках ферромагнитных материалов, образуются агрегаты, размер и форма которых зависят от формы и размеров самих частиц, а их состояние меняется при различных воздействиях на порошок [1- 4]. В постоянном магнитном поле изменяется форма агрегатов, их размеры и происходит ориентация вдоль силовых линий поля магнитных моментов агрегатов, а не отдельных частиц.

Для создания анизотропии магнитных свойств ферритбариевых магнитов осуществляют прессование из водной

сусpenзии ферритового порошка в магнитном поле напряженностью 300-500 кА/м [5]. Наличие водной пленки на поверхности частиц облегчает процесс ориентации их во внешнем поле. Для получения текстуры используются так же специальные смазки, перевод дисперсной среды в псевдоожженое состояние. Наибольшее промышленное применение получили вибрационные методы перевода порошка в псевдоожженное состояние [6]. Перевод дисперсной среды ферромагнитного материала в псевдоожженное состояние возможен в переменном неоднородном и постоянном магнитных полях. После перевода порошка в пресс-форме в псевдоожженное состояние, последующее увеличение индукции постоянного магнитного поля и прессование только в постоянном магнитном поле позволяет сформировать магнитную текстуру порошковых изделий [7, 8]. Степень сформированной текстуры зависит в частности от параметров электромагнитного воздействия.

Изучение реологических особенностей псевдоожженного слоя, образованного из порошков ферромагнитных материалов, представляет научный интерес, а также является актуальным для решения практических задач, связанных с формированием технологических характеристик порошка и свойств постоянных магнитов.

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров электромагнитного воздействия на реологические особенности псевдоожженного слоя, образованного из порошка феррита бария, в переменном неоднородном и постоянном магнитных полях.

Для исследований использовали порошок феррита бария со средним размером частиц 1 мкм. Перевод порошка в псевдоожженное состояние осуществляли путем воздействия магнитными полями: постоянным, силовые линии которого располагаются горизонтально и переменным неоднородным с силовыми линиями в вертикальной плоскости [9].

Для исследования реологических особенностей псевдоожженного слоя применяют фотометрический [10] и индуктивный [11] способы.

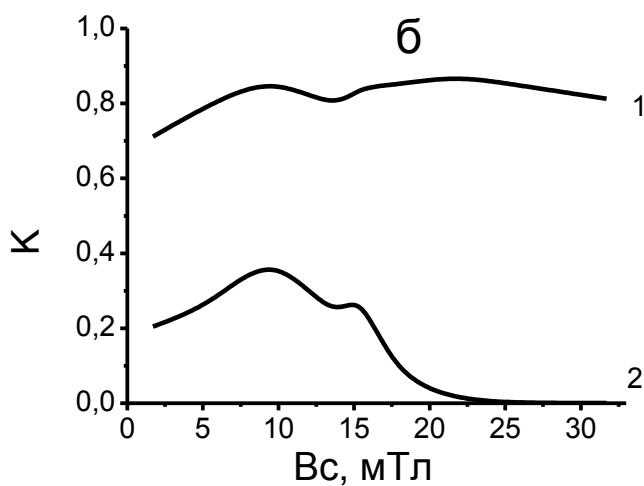
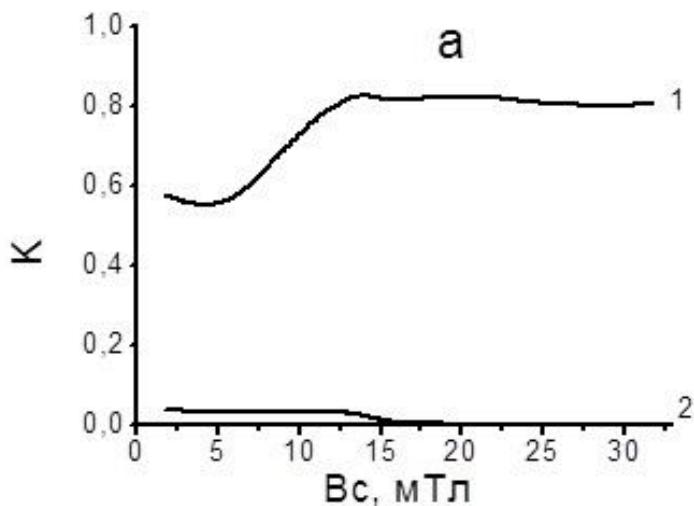
Под действием сил, обусловленных воздействием на частицу полей соседних ферромагнитных частиц и внешних

магнитных полей частицы в псевдоожженном слое движутся поступательно с резким изменением направления движения. Характер движения частиц и агрегатов зависит от многих факторов – параметров электромагнитного воздействия, массы, формы и размеров частиц, их магнитных свойств, вязкости среды и т.д.

Для исследования динамики распределения дисперсной среды в псевдоожженном слое в зависимости от параметров электромагнитного воздействия проводилась видеосъемка дисперсной среды, находящейся в прозрачной камере. По изображениям псевдоожженного слоя определяли коэффициент  $K$ , который равен отношению площади, занимаемой порошком рассматриваемой зоны камеры, к площади этой части камеры. Коэффициент  $K$  характеризует плотность распределения дисперсной среды по высоте камеры.

Из рис. 1 следует, что в области камеры до 6 мм от дна минимальное значение  $K$  равное 0,57 наблюдается в постоянном магнитном поле с индукцией 1,7 мТл и переменном магнитном поле с градиентом индукции 60 мТл/м. При увеличении градиента индукции до 90 мТл/м значение  $K$  возросло на 23%. Дальнейшее увеличение градиента индукции до 150 мТл/м позволило увеличить  $K$  всего на 11%. При повышении градиента индукции до 175 мТл/м значение  $K$  даже уменьшилось на 4%.

В области камеры от 18 до 24 мм при градиенте индукции 60 мТл незначительное количество дисперсной среды присутствует только в постоянном магнитном поле до значения индукции 15 мТл (рис. 1а). При градиенте индукции переменного магнитного поля 175 мТл/м и индукции постоянного магнитного поля 1,7-18 мТл максимальное отличие плотности распределения дисперсной среды на высотах 18-24 мм и 0-6 мм составляет 20% (рис. 1г). Дальнейшее увеличение индукции постоянного магнитного поля приводит к резкому уменьшению дисперсной среды в камере на высоте 18-24 мм. Полученный результат объясняется тем, что с ростом индукции постоянного магнитного поля увеличиваются размеры сформированных агрегатов, растет их масса, поэтому для их подъема необходима большая сила.



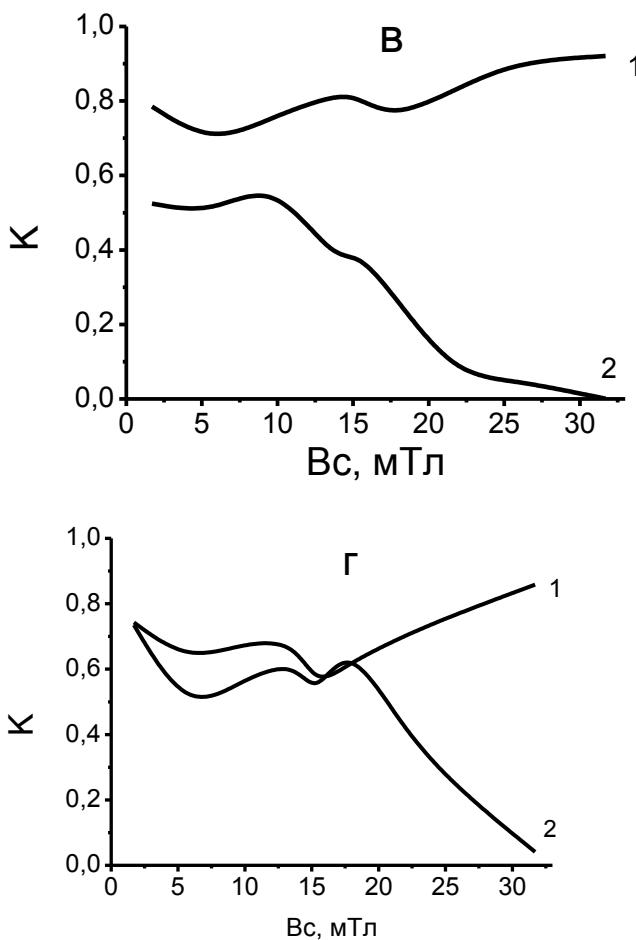


Рис. 1. Зависимости коэффициента  $K$  псевдоожженного слоя в камере на высоте 0-6 мм (1), 18-24 мм (2) от индукции постоянного магнитного поля при значениях градиента индукции переменного магнитного поля: 60 (а), 90 (б), 120 (в), 175 (г) мТл/м.

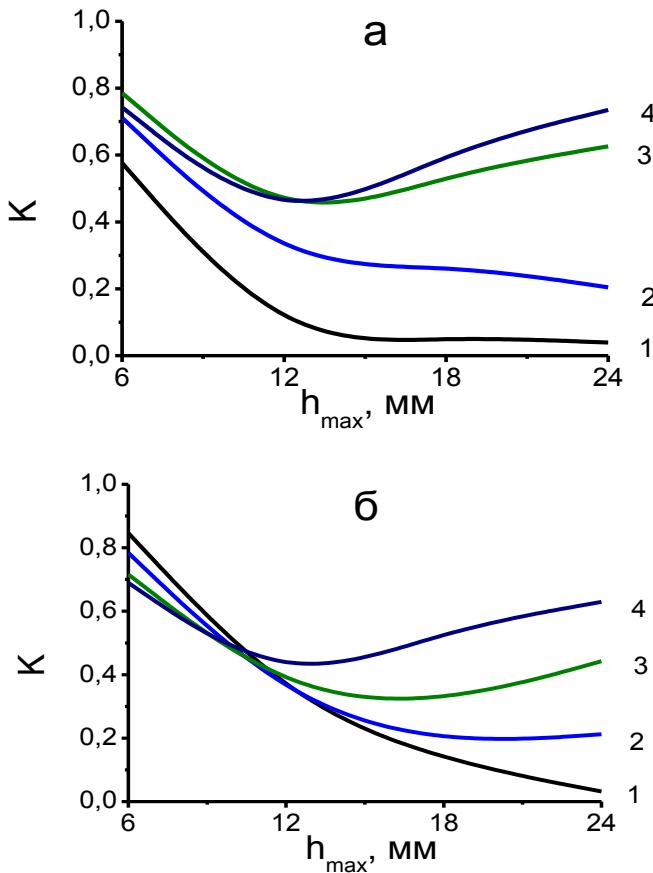


Рис. 2. Зависимости К от высоты расположения псевдоожиженного слоя в камере при значении индукции постоянного магнитного поля 1,7 (а), 13,7 мТл (б) и значениях градиента индукции переменного магнитного поля: 60 (1), 90 (2), 150 (3), 175 мТл/м (4).

Из рис. 2а видно, что при значении индукции постоянного магнитного поля 1,7 мТл с ростом градиента индукции до 150 мТл/м плотность псевдоожиженного слоя в камере возрастает в каждой зоне камеры. При дальнейшем увеличении градиента индукции значение К меняется незначительно. В постоянном

магнитном поле с индукцией 13,7 мТл значение К значительно увеличивается с ростом градиента индукции в зонах камеры на высоте 12-24 мм (рис. 2б). Так коэффициент К в слое на высоте 18-24 мм возрастает с 0,02 при 60 мТл/м до 0,63 при градиенте 175 мТл/м.

Следовательно, при организации псевдоожижения порошков ферромагнитных материалов в переменном неоднородном и постоянном магнитных полях управление пространственным расположением образованного слоя, его однородностью и величиной агрегатов, образованных в поле, осуществляются путем изменения параметров электромагнитного воздействия.

- 
1. Болога М.К. Образование упорядоченных структур в системе магнитоустойчивых диполей в переменном магнитном поле / М.К. Болога, И.Ф. Марта, С.Ф. Сюткин // Тез. докл. З Всесоюзн. школы-семинара по магн. жидк. – М. – 1983. – С. 32 – 33.
  2. Болога М.К. Магнитоожижение во вращающемся магнитном поле / М.К. Болога, И.Ф. Марта // Магнитная гидродинамика. – 1988. - №3. – С. 103 – 108.
  3. Пирожков Б.И. Исследование явлений агрегирования в магнитной жидкости методом скрещенных полей / Б.И. Пирожков // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1987.- Т.51, № 6.- С. 1088 – 1093.
  4. Болога М. К. Некоторые особенности магнитоожижения дисперсных систем / М. К. Болога, С. В. Сюткин // Магнитная гидродинамика.- 1981.- № 4.- С. 3-4.
  5. Постоянные магниты: Справочник / Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др.; Под ред. Ю.М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
  6. Дорофеев Ю.Г. Теория получения металлических порошков и их формования: Учеб. пособие / Ю.Г. Дорофеев, В.Ю. Дорофеев, А.В. Бабец // Новочерк. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: НГТУ, 1999.- 144 с.
  7. А. с. 1380054 ССР. МКИ4 Г01 Н 27/79. Способ изготовления постоянных магнитов / Н.С. Биткина, Ю.М. Вернигоров, С.И. Егорова, Г.Ф. Лемешко.- № 4041546; заявл. 24.01.86; зарег. 08.11.87. Бюл. № 3.
  8. Egorov I.N., Vernigorov Yu.M., Egorova S.I. The application of magnetovibrating technology in powder metallurgy // Proceedings of the 2nd International Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields: March, Grenoble, France, 2006.- Р. 85-88.
  9. Егоров И.Н. Исследование электромагнитного воздействия на процессы структурообразования в магнитоожженном слое ферритовых дисперсных систем / И.Н. Егоров // Вестник ДГТУ. – 2012. - № 3 (64). – С. 44 – 50.
  10. Райченко А. П. Введение в фотометрию металлических порошков / А.П. Райченко.- Киев: Наук. думка, 1973.- 174 с.
  11. Пирожков Б.И. Исследование явлений агрегирования в магнитной жидкости методом скрещенных полей / Б.И. Пирожков // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1987.- Т.51, № 6.- С. 1088 – 1093.

**УДК 621.9.048.6**

**МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРОУДАРНОГО  
УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В РЕЖИМЕ  
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ CUDA**

*Копылов Ю.Р., Верзилина О.А.*

ВГТУ, Космос нефте-газ, Воронеж, Россия,  
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова

Процессы виброударного упрочнения деталей теоретически исследуются в настоящее время посредством теории вибрационного перемещения материальной точки [1], динамики многомассных виброударных систем типа "столбиков" и "цепочек" [2 и др.], имитационного моделирования сплошных сред [3], статистической механики сплошных сред [4], численного моделирования на основе интегральных вязкоупругих свойств инструментальной среды [5] и моделирования на основе динамики гранулированных сред [6]. Во всех методах моделирования важная роль принадлежит эксперименту. Проблема математического моделирования процессов виброударного упрочнения деталей в конечном итоге связана с модельными представлениями инструментальной среды, состоящей из множества интенсивно выбирирующих и периодически соударяющихся между собой и деталью абразивных гранул или стальных шариков размером от 0,3-0,5 до 1,0-3,0 см, находящихся в технологической жидкости.

В настоящей статье дается оценка продолжительности математического моделирования виброударного упрочнения, в которых выбирирующая инструментальная среда представляется сплошным телом без учета реальных динамических свойств методом имитационного моделирования (1-й вариант); с учетом экспериментально определенных диссипативных, квазиупругих и зазорных осредненных по объему (интегральных) свойств инструментальной среды (2-й вариант); выражения диссипативных и квазиупругих свойств через динамические зазоры (3-й вариант), прямого компьютерного моделирования конечного множества дискретных размерных частиц инструментальной среды (4-й вариант) на основе динамики гранулированных сред.

В настоящей работе приняты следующие обозначения методов моделирования: им – имитационное моделирование; инт –моделирование с учетом интегральных упруго-диссипативных и зазорных свойств инструментальной среды; спл – моделирование конечного множества дискретных частиц с расстоянием между поверхностями детали и контейнера 25, 50, 75 и 100 мм; cuda - моделирование при помощи видеокарты NVidia CUDA с расстоянием между поверхностями детали и контейнера 100 мм

Для оценки продолжительности и погрешности моделирования, рассматривается различное количество  $n_{ш}$  шариков соответствующих указанным расстояниям между поверхностями детали и контейнера. Для всех методов моделирования диаметр контейнера равен 34 см, диаметр детали 14 см, диаметр стальных шариков 0,5 см, амплитуда совместных вынужденных колебаний детали с контейнером 0,6 см, частота 21 Гц. Для исключения влияния формы детали и траектории колебаний на погрешности метода моделирования использовались контейнер и деталь цилиндрической формы, траектория колебаний - круговая, деталь закрепляется в центре контейнера. Коэффициент загрузки контейнера инструментальной средой равен 0,7.

При имитационном моделировании инструментальная среда рассматривается как упруго-вязкое сплошное тело. Имитационные математические модели отражают развитие процесса вибродинамического упрочнения во времени при задании внешних как правило кинематических воздействий на процесс, заданные в алгоритмической форме и основано на прямом описании моделируемого процесса, где соблюдается структурное подобие объекта и модели, с возможностью управления масштабом времени. Процесс исследуется вначале без учета свойств инструментальной среды. Затем технологическая система наделяется такими численными значениями упругих и диссипативных свойств, которые обеспечивают наибольшее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Перебором численных значений добиваются наибольшее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Те значения, при которых обеспечивается наибольшее их совпадение условно принимаются за реальные.

Также в работе дается предположительная оценка времени моделирования по предварительному анализу использования технологии NVIDIA CUDA.

Используются динамические и технологические критерии сравнения: амплитудные, фазовые и частотные характеристики, скорость и энергия соударений, рассеянная в инструментальной среде [1, 2]. Метод не учитывает форму упрочняемой детали, свойства реальных технологических систем и имеет в этой связи недостаточную достоверность. Погрешность моделирования по технологическим параметрам виброударной обработки достигает 150-200%

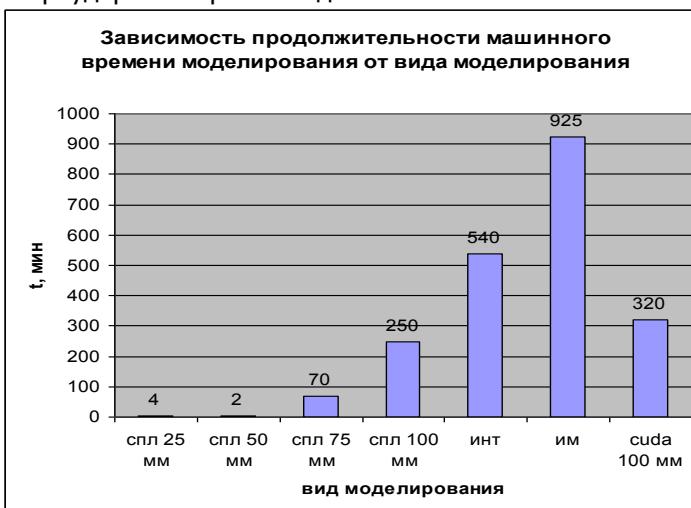


Рис. 1. Зависимость продолжительности вычислений ( $t$ , мин) от вида моделирования: им – имитационное моделирование [2]; инт – моделирование методом интегральной оценки свойств инструментальной среды [3]; спл – сплайновое моделирование при расстоянии между деталью и контейнером ( $n=25, 50, 75$  и  $100$  мм) [4, 6]; cuda – сплайновое плоское моделирование с использованием 3D видеокарт и технологий Nvidia CUDA [5] при  $n=100$  мм.

Время моделирования составляет 4-5 минут. Относительная погрешность имитационного моделирования в сравнении с экспериментом составляет 150-200 %. Метод дает меньшие погрешности при исследовании процессов

виброобработки деталей без закрепления, когда обрабатываемые детали под действием циркуляционных перемещений инструментальные частицы и детали проходят многократно и последовательно все неравномерные по интенсивности зоны обработки. Серьезным недостатком имитационного метода моделирования является невозможность учета формы и расположения поверхностей и размеров детали, а так же - динамических свойств инструментальной среды

Математическое моделирование методом интегральной оценки квазиупругих и диссипативных свойств, динамических зазоров инструментальной среды, позволяет несколько точнее определять динамические и технологические параметры процесса. Расчетные значения шероховатости, наклена и остаточных напряжений присваиваются всем участкам поверхностям детали. Метод обеспечивает в среднем для деталей простой формы [3] погрешность 50-90%. В этом случае для каждой детали необходимо экспериментальное определение указанных свойств в пограничном слое, что связано со значительными затратами. Для сокращения затрат на проведение экспериментов, квазиупругие и диссипативные свойства инструментальной среды аналитически выражаются через динамические зазоры, которые проще определить экспериментально посредством съемки цифровой камерой через прозрачную торцевую стенку контейнера. Здесь учитывается приближенное распределение свойств инструментальной среды в поперечном сечении технологической системы в зависимости от угловой координаты и удалении от детали и контейнера. Геометрическая модель учитывает лишь габаритные размеры детали и контейнера, поэтому погрешности моделирования по прежнему остаются значительными и составляют 50-100%. Время моделирования невелико и составляет 2-4 мин [3].

Метод сплайнового моделирования конечного множества дискретных частиц в характерных сечениях детали [4, 6, 7] основан на прямом компьютерном моделировании динамики частиц. Геометрическая модель строится с высокой размерной точностью (до миллиметра) в масштабе, заполняется инструментальной средой, контуры детали разбиваются на сплайны; задается закономерность колебаний. В результате решения уравнений определяются начальные и текущие

координаты перемещений частиц, сплайнов детали и контейнера, по которым вычисляются скоростные и энергосиловые параметры, затем технологические параметры процесса: шероховатость, наклеп и остаточные напряжения, и погрешности их сплайнового формирования.

Экспериментальная проверка достоверности математического моделирования вибруударного упрочнения показала, что относительные погрешности динамических параметров процесса (скорости и энергии соударений) составляет: для цилиндрической детали от 20 до 70 %, для балки лонжерона от 40 до 135 %. Относительные погрешности технологических параметров для детали простой цилиндрической формы, для толщины слоя инструментальной среды 100 мм, составляют от 6 до 39% (рис. 2), для детали типа силовой балки лонжерона – от 12 до 77 %.

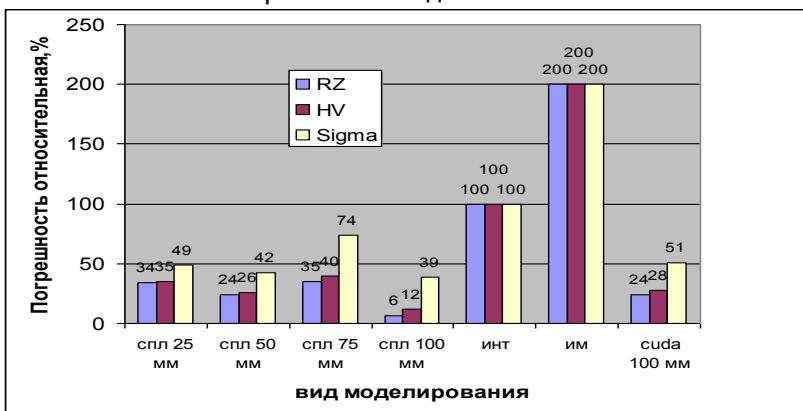


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности математического моделирования в зависимости от вида метода моделирования: Rz – среднеарифм. высота микронеровностей; HV – степень наклена; Sigma – сжимающие остаточные напряжения первого рода в поверхностном слое детали

Метод дискретных элементов дает наименьшую погрешность (рис. 2), но здесь требуется большое время моделирования. При использовании технологии NVIDIA CUDA в методе дискретных элементов, по предварительной оценке, можно достичь меньшие погрешности и меньшее время моделирования.

На сегодняшний день разработаны программы моделирования процесса ВУ в плоском сечении (2D) и псевдо-трехмерные, где трехмерная картина определяется из аппроксимации результатов моделирования в плоских сечениях по всей длине детали в среде Delphi 7 (32 bit). Нужно отметить, что процесс моделирования динамики ансамбля гранул достаточно трудоемок и требует больших вычислительных мощностей. Основными возможностями существующих программ является моделирование динамических и технологических параметров: динамические – скорость, ускорение, энергия напряжения и др., технологические – шероховатость, наклеп и др.

Методы дискретного элемента требуют интенсивной работы процессора ЭВМ; это ограничивает геометрические размеры модели и (или) количество частиц. Последние усовершенствования в программном и аппаратном обеспечении позволили воспользоваться возможностью параллельной обработки, чтобы бороться с этими ограничениями.

Например, моделирование 42 периодов стационарных колебаний с частотой 21 Гц в контейнере с диаметром 520 см при 75-80%-ом заполнении его свободного объема шариками диаметром 0,5 см занимает около 30-35 часов реального времени непрерывной работы компьютера.

Для сокращения времени моделирования предлагается задействовать технологию NVidia CUDA – расчет ансамбля частиц на 3D видеокарте компьютера. Это позволяет достигнуть высокой степени распараллеливания вычислений и соответственно – высокой производительности вычислений.

Попытку предоставить большие вычислительные мощности на массовом потребительском рынке предприняла американская фирма NVidia, представив в конце 2006 года видеопроцессор G80. Им оснащались видеоакселераторы GeForce 8-й серии. Отличительной особенностью этого микрочипа являлось поддержка CUDA (Compute Unified Device Architecture) - программно-аппаратной архитектуры, позволяющей производить вычисления с использованием графических процессоров, поддерживающих технологию GPGPU (произвольных вычислений на видеокартах). Данный видеопроцессор имел до 128 потоковых процессоров и

мог выступать как своеобразный сопроцессор для решения обширного круга задач [8]. Фирма NVidia во всех последующих семействах своих продуктов: GT200, Fermi постоянно совершенствует эту архитектуру, добавляя новые возможности. Сейчас CUDA присутствует в следующих сериях графических чипов: GeForce, Quadro и Tesla. Технология Cuda позволяет разрабатывать пользовательские параллельные алгоритмы и библиотеки, используя знакомый язык программирования, такой как C, C++, C#, Fortran, Java, Python и т.д.

Для того, чтобы значительно сократить время моделирования необходимо в существующую программу моделирования, написанную в среде Delphi 7.0 включить реализацию вычислений с использованием dll. Таким образом, все функции, которые выполняются достаточно продолжительное время (тяжелые функции) вынести в dll, которые в свою очередь написать на языке visual studio C++ с распараллеливанием. Для этой задачи приобретена видеокарта GeForce GT 640 технические характеристики которой представлены в табл.1. GeForce

GT 640 – первая модель на базе архитектуры Kepler, которая вместо GPU GK104 использует GK107. Площадь чипа GK107, содержащая 1,3 миллиарда транзисторов, составляет 118

$\text{мм}^2$ , что меньше, чем у GK104 с 294  $\text{мм}^2$ .



Рис. 3. Видео карта Palit GT640, с распараллеливания вычислений

Таблица 1.

## Технические характеристики 3D видеокарты GeForce GT 640

Количество GPU	1
Частота ядра, МГц	902
Техпроцесс	28 нм
Пиксельные шейдеры (PS)	384
Версия шейдеров	5
Блоки растеризации (ROP)	16
Объем памяти	1024
Тип видеопамяти	GDDR3
Частота видеопамяти, МГц	1782
Разрядность шины видеопамяти, бит	128

По существу, чип GK107 карты GeForce GT 640 использует четверть шейдерных ресурсов полнофункционального GPU GK104. 384 ядра CUDA поделены на два блока SMX, каждый содержит 16 блоков текстурирования (всего 32). Частота ядра нового чипа составляет 900 МГц. GeForce GT 640 не может повышать частоту, поскольку у карты отсутствует функция GPU Boost.

Начинка GPU состоит из двух групп блоков растеризации, каждая способна выводить восемь 32-битных пикселей за такт, что в сумме дает 16. Две 64-битных шины памяти в совокупности составляют 128-бит. 2 Гбайт памяти DDR3 работают на частоте 891 МГц, в результате пропускная способность памяти достигает 28,5 Гбайт/с. В каждой операции однотипные задачи выполняются параллельно. Распараллеливаются операции: инициализации, интегрирования уравнений, движения элементов системы, построение двухмерных сеток, определения взаимодействий элементов, аффинные преобразования.

Алгоритм распараллеливания вычислительных задач с использованием NVIDIA CUDA. Выделяется память на GPU, копируются данные из памяти CPU в выделенную память GPU. Осуществляется запуск ядра (или последовательно запускается несколько ядер). Обрабатывается в каждом экземпляре

функции-ядра выделенного элемента входных данных с внутренней синхронизацией и записывается в выходную структуру. Копируются результаты вычислений обратно в память CPU. Освобождается выделенная память GPU.

Предварительные исследования показывают, что использование распараллеливания на указанной 3D видеокарте GeForce GT 640 и использования технологий Nvidia CUDA скорость моделирования процесса виброударного упрочнения может сократится до режима «реального» времени упрочнения.

- 
1. Кобринский А.Е., Кобринский А.А. Виброударные системы. Динамика и устойчивость. – М.: Наука, 1973. – 591 с.
  2. Субач А.П. Динамика процессов и машин объемной вибрационной и центробежной обработки насыпных деталей. Рига. Изд. Зинатне. 1991. – 400 с.
  3. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение. Воронеж. ВГУМВД. 1999. – 386 с.
  4. Шевцов С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С. Н. Шевцов. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ, 2005. – 194 с.
  5. Копылов Ю.Р., Копылов С.Ю. Трехмерное моделирование виброударного упрочнения с использованием программной платформы CUDA. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012. № 2-6. С. 104-109.
  6. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Научная монография. – Воронеж: Научная книга; 2011. – 569 с.
  7. Копылов А.Ю. Численное моделирование погрешностей виброударного упрочнения деталей. // Техника машиностроения. 2004. № 5. С. 16-19.
  8. Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 232 с.

**УДК 621.762.53**

## **ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ УДАРНОЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ СПЕКАНИЕ**

*Лемешев С.В., Агеев С.О., Рачков М.А., Перлов Д.С.,  
Нескоромный С.В.*

*ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

Вследствие неблагоприятных условий окружающей среды при эксплуатации магистральных трубопроводов с рабочим давлением до 9,8 МПа, возможно снижение толщины стенок в связи с ее коррозионными повреждениями.

Для снижения коррозии стенок трубопроводов используют катодный метод защиты, сущность которого заключается в подаче напряжения на трубу через вывод электрохимической защиты (ЭХЗ). При этом, смещается электрохимический потенциал трубы в отрицательную сторону, снижая процесс коррозии.

Вывод ЭХЗ представляет собой медный или латунный провод, который укладывают на поверхность трубы из низколегированной стали и приваривают ручной дуговой или термитной сваркой.

Схема термитной сварки вывода ЭХЗ к поверхности трубы приведена на рис. 1.

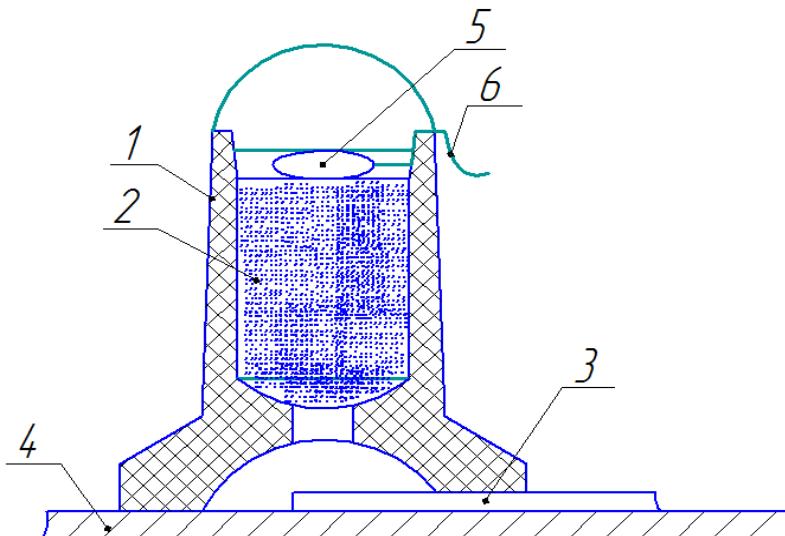


Рис. 1 Реализуемая схема термитной сварки вывода ЭХЗ  
1-разовая тигель-форма; 2-термитная смесь; 3-вывод ЭХЗ; 4-проводы вывода ЭХЗ; 5-стенка газопровода; 6-термоподжиг; 7-огнепроводный шнур

Процесс осуществляется следующим образом. На стенку газопровода 5 укладывают провод 3, являющийся выводом ЭХЗ. Разовую тигель - форму 1 устанавливают на очищенную от изоляции часть провода, затем насыпают термитную смесь 2,

состоящую из порошка  $CuO$ , и железной окалины типа  $Fe_3O_4$ , производят инициацию термитной реакции за счет термоподжига 5, поджигая огнепроводный шнур 6.

Впоследствии, образуется сварное соединение высотой наплавки  $5,0 \pm 2,0$  мм. и диаметром  $30 \pm 5,0$  мм [1].

Основными требованиями к качеству сварного соединения являются визуально-измерительный контроль геометрических размеров сварного соединения, прочность сварного соединения при многократном изгибе вывода ЭХЗ, отсутствие пор и трещин.

Недостатками существующих технологий является необходимость подготовки свариваемых поверхностей и сварочных материалов (электроды, термитные смеси), все это в целом снижает производительность процесса. Кроме того, разность теплофизических свойств свариваемых материалов приводит к появлению в структуре сварного соединения интерметаллидных включений, что обуславливает появление трещин.

Снизить трудоемкость и повысить качество сварных соединений позволит использование импульсных способов сварки. Одним из таких способов является электроимпульсная сварка-прессование (ЭИСП), принципиальная схема которой приведена рис. 2 [2].

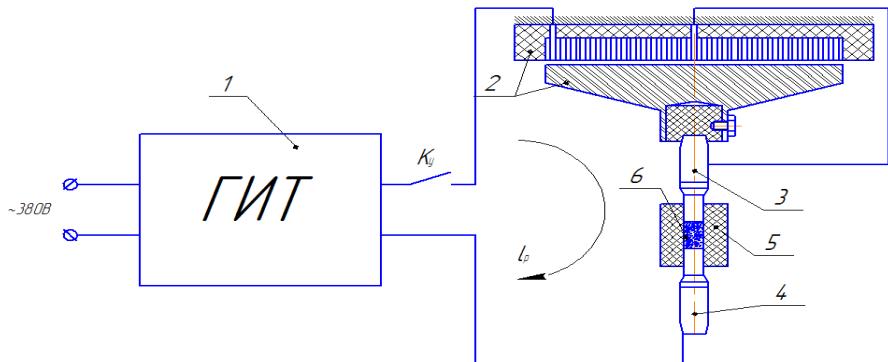


Рис. 2 Принципиальная схема ЭИСП

1- генератор импульсных токов (ГИТ); 2- индукционно-динамический привод; 3, 4- пuhanсоны; 5- диэлектрическая матрица; 6 – спекаемый порошок

$I_p$  – ток разряда,  $K_y$  – коммутирующее устройство

В диэлектрическую матрицу 5 засыпают спекаемый порошок 6 и прижимают электродами-пуансонами 3 и 4. Индукционно-динамический привод (ИДП) 2 подключают последовательно с генератором импульсных токов (ГИТ) 1 и пуансонами, что позволяет синхронизировать процесс теплового и механического воздействия на спекаемый порошок.

Спекание порошка происходит за счет пропускания импульса тока длительностью до 180 мкс. с одновременным динамическим нагружением через коммутирующее устройство К<sub>у</sub>. Использование жестких режимов сварки позволяет получать изделия с минимальной пористостью.

В ДГТУ, лаборатории «Магнитно-импульсных технологий» предложено реализовать процесс получения выводов ЭХЗ с использованием вышеприведенной схемы.

В качестве вывода ЭХЗ использовали медный провод марки М1к диаметром 2мм, порошок марки ПСК. Металлическая пластина интерпретировала поверхность трубы из стали марки ВСт3сп.

Принципиальная схема реализуемого процесса представлена на рис. 3.

При разряде батареи конденсаторов формируется высокочастотный импульс, который проходит через порошковую заготовку, тем временем в индукторе формируется магнитный поток, магнитное давление которого действует на толкателем и заставляет его перемещаться, тем самым создавая ковочное усилие. Формировать соединение между порошком, металлической пластиной и проволокой происходит за время порядка 180 мкс.

Эксперименты проводились с использованием источника энергии ГИТ-2.1 со следующими параметрами: Емкость накопитель составляла 600·мкФ, диапазон вводимой энергии равен 4,8 ÷ 6,912 кВ, ток разряда составлял примерно 90кА, для создания динамического нагружения, использовался индукционно – динамический привод, в состав которого входил плоский 7-ми витковый индуктор с толкателем массой 500г.

Установлено, что на получение сварного соединения влияет размер частиц порошка, давление электрода и количество вводимой энергии [2,3].

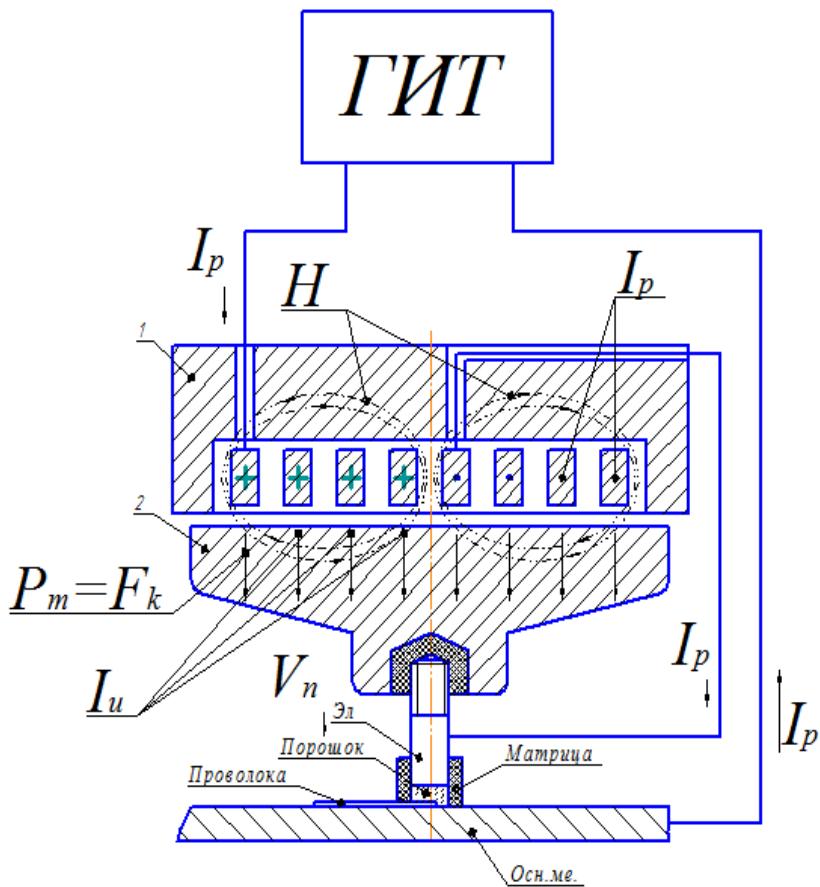


Рис. 3 Принципиальная схема импульсного процесса соединения разнородных материалов электроимпульсной сваркой-прессованием

ГИТ (генератор импульсных токов); БУ-блок управления процессом сварки; 1 - плоский индуктор; 2 - толкатель; Н - магнитный поток;  $F_k$  - ковочное усилие; Рм-магнитное давление;  $I_u$  - ток индуцированный;  $I_p$  - ток разряда Эл-электрод; Осн.Ме.- основной металл (поверхность трубы);  $V_n$  – скорость перемещения толкателя

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены образцы, представленные на рис.4

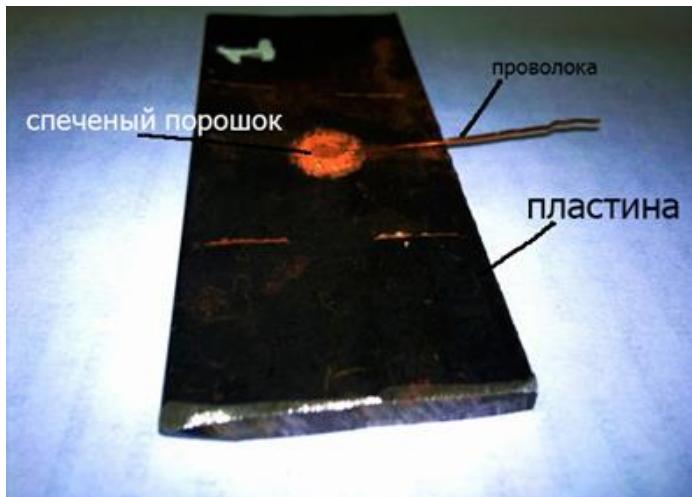


Рис. 4 образец вывода ЭХЗ с пластиной

Качество сварных соединений оценивали испытаниями на изгиб. Проволока выдерживает пятикратный изгиб, что удовлетворяет нормативному документу [1].

На макрошлифе видна линия раздела -зона «схватывания» разнородных металлов, рис. 5

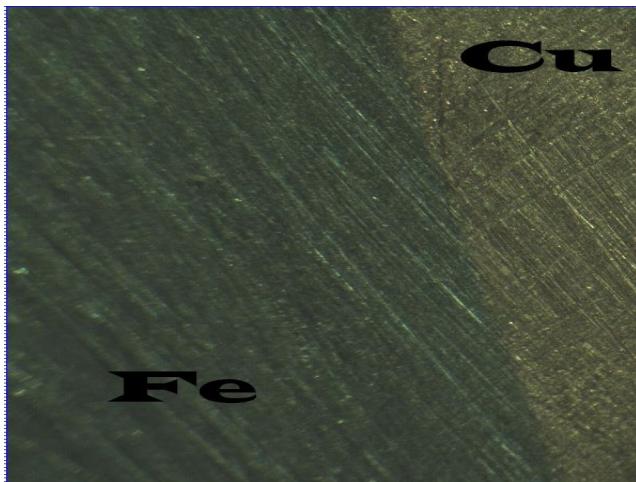


Рис.5 Макрошлиф соединения разнородных металлов, полученной ЭИСП, х485

При использовании электроимпульсной сварки-прессования вывода ЭХЗ нет необходимости применять предварительный подогрев с последующей термообработкой в связи с кратковременностью процесса, зачистку поверхностей от брызг расплавленного медного порошка, выделение в зоне соединения строго дозированной вводимой энергии обеспечивает стабильное качество процесса.

- 
1. СТО Газпром 2-2.2-136-2007-«Сварка выводов электрохимической защиты»
  2. Пат. 136754 Российская Федерация. Устройство для электроимпульсного спекания/ Е. Л. Стрижаков С. В. Нескоромный, М. А. Рачков. – № 2013114033/02; заявл. 28.03.2013; опубл. 20.01.2014, Бюл. №2
  3. Григорьев Е.Г., Калин Б.А. Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 152 с.

**УДК 636.085.54:**

**ОСНОВЫ ВИБРОВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ В ВИНТОВЫХ  
БАРАБАНАХ**

*Марченко А.Ю.*

ФГБОУ ВПО «Кубанский ГАУ», г.Краснодар, Россия

Развивающиеся рыночные отношения и современные технологии переработки сыпучих материалов, а именно: смещивание продукции сельскохозяйственного назначения – компонентов концентрированных кормов (далее концкормов), требуют постоянного повышения качества не только готового продукта, но и сырья, снижения его стоимости, так как при использовании в рационах кормления животных концкормами продуктивность животных возрастает до 70%.

Разнообразие компонентов концкормов, многокомпонентность, высокие требования к качеству, обуславливают сложность выбора эффективного технологического оборудования для их смещивания. Создание условий для интенсификации процесса смещивания компонентов концкормов и применение эффективных методов воздействия на компоненты концкормов, непрерывная реализация технологического движения и ликвидация непроизводительного труда –(создание ресурсосберегающих машинных технологий смещивания компонентов концкормов)–является важнейшей задачей развития и совершенствования технологических машин в кормопроизводстве. Такая задача может быть решена внедрением прогрессивного технологического комплекта оборудования на базе новых конструкций рабочих органов, а также волновых и виброволновых технологий, позволяющих осуществлять смещивание компонентов концкормов непрерывным потоком в процессе их приготовления

и использование рабочих органов с дискретно расположенным по периметру, разнонаправленными по отношению к винтовым линиям плоскими элементами, называемыми винтовыми барабанами. Поэтому, совершенствование процесса смещивания компонентов концкормов путем оптимизации конструктивно-режимных параметров винтовых барабанов, создание не только основ виброволновой теории приготовления концентрированных

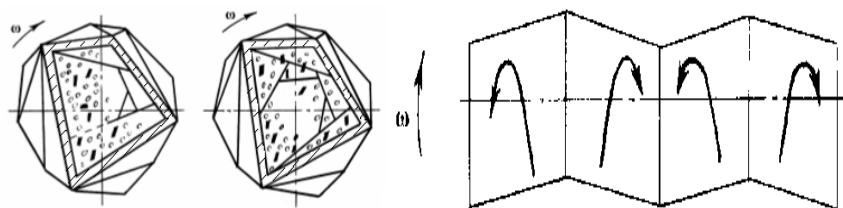
кормов, но и новых конструкций винтовых барабанов и основ их конструирования, расчета, а так же исследование их технологических возможностей является актуальной народнохозяйственной задачей.

Новизна технологического процесса и оборудование для его реализации в виде винтовых барабанов с дискретно расположенными по периметру разнонаправленными по отношению к винтовым линиям плоскими элементами позволяет активизировать процесс смещивания за счет интенсивности волновых и виброволновых перемещений компонентов концкормов, направляя последние не только навстречу друг другу, но и к противоположным врачающимся стенкам винтового барабана.

Новизна технологического процесса волновых и виброволновых перемещений компонентов концкормов и оборудование на базе винтовых барабанов для его реализации, отсутствие сведений о его эксплуатации вызывает необходимость проведения исследований основных параметров и технологических возможностей винтовых барабанов, разработку расчетных зависимостей для определения оптимального конструктивно-режимного параметра  $V$ - скорости продольного перемещения компонентов концкормов внутри винтового барабана (мм/с), с помощью которой мы сможем определить оптимальную длину винтового барабана, минимальную, но достаточную для выполнения технологических процессов приготовления концкормов.

Анализ движения частиц концкормов в винтовых барабанах показал, что частицы компонентов концкормов, находясь внутри врачающегося винтового барабана, увлекаясь плоскими элементами, в определенный момент, под действием силы тяжести, скатываются вниз в лавинообразном или водопадном режимах (рисунок 1 а,б), при этом, в зависимости от конструктивных особенностей винтовых барабанов [1,2,3,4], вдоль продольной оси они совершают возвратно-поступательное движение в продольном направлении, точнее волновое движение.

]



а)

б)

в}

Рисунок 1- Схема движения частиц сыпучих концкормов в поперечном (а, б) и в продольном сечениях (в) винтового барабана Ц 5.5.1. а)- лавинообразное движение компонентов концкормов, б)- водопадное движение компонентов концкормов, в)- возвратнопоступательное (волновое) движение

При лавинообразном движении (рисунок 1,а) часть частиц компонентов концкормов, поднимаемая плоскими элементами, по направлению вращения винтового барабана несколько выше угла своего естественного откоса, скатывается вниз. При этом, верхние слои частиц компонентов концкормов вращаются вокруг собственной оси, втягивая близлежащие слои. В результате, происходит скольжение, перекатывание частиц компонентов концкормов относительно друг друга, удары небольшой силы. Таким образом, в винтовых барабанах при лавинообразном движении, частицы компонентов концкормов движутся от загрузки к выгрузке волнообразно, при этом подвергаются перемешиванию с небольшими ударами.

При водопадном режиме движения (рисунок 1,б) частицы компонентов концкормов, вследствие возникающих при вращении центробежных сил, поднимаются по направлению движения плоского элемента винтового барабана значительно выше угла своего естественного откоса, затем, отрываются от него, и под действием силы тяжести падают вниз, ударяясь о слой частиц, движущийся под другим углом или находящимся на поверхности другого плоского элемента винтового барабана. Следовательно, при водопадном режиме движения в винтовых барабанах, частицы компонентов концкормов двигаются с большей скоростью и подвергаются ударам. Однако, в действительности, движение частиц в винтовом барабане

отличается от теоретического, описанного выше. В зависимости от габаритов винтового барабана, массы частиц, коэффициента заполнения винтового барабана, скорости вращения, геометрии винтового барабана и ряда других факторов, большая или меньшая часть загрузки может работать в лавинообразном режиме, остальная – в водопадном (в этом случае имеет место смешанный водопадно - лавинообразный режим). Наличие по периметру винтовых барабанов плоских элементов различной формы и размеров, разнонаклоненных не только к оси винтовых барабанов  $O_1-O_1$ , но и друг к другу, изменяет направление движения частиц компонентов концкормов в продольном и поперечном сечениях, сообщая ему дополнительное движение и в плоскости, перпендикулярной плоским элементам. Это дополнительное движение для каждого винтового барабана различно по углу наклона и энергоемкости и обеспечивает создание волновой и виброволновой технологии приготовления концкормов.

Плоские элементы, из которых собраны винтовые барабаны, неодинаковые по площади, размерам и конфигурации, работая как полки, захватывают различные по объему порции частиц, перемещают их по направлению вращения винтового барабана, направляют эти порции не в плоскость, перпендикулярную к оси вращения, а расположенную под некоторым углом к ней, т. е. в плоскость, перпендикулярную этим полкам, нарушая, таким образом, стационарность движения потоков частиц компонентов концкормов и направляя их навстречу друг другу.

Частицы компонентов концкормов при смещивании непрерывным потоком движутся через внутреннюю полость винтового барабана–рабочую камеру заданной формы и размера, ориентированную определенным образом в пространстве и совершающую вращательное движение с изменением своей угловой ориентации относительно некоторой неподвижной точки пространства, таким образом, это вызывает в ней достаточно сложное волновое движение, с наложением колебаний больших амплитуд (10 – 500 мм и более), но малой частоты, точнее виброволновое движение. Цель этого движения – транспортировка и смещивание частиц компонентов концкормов. Поэтому, необходимо определить при заданных

геометрических характеристиках винтового барабана, его ориентации и параметрах движения, скорость продольного перемещения частиц компонентов концормов.

Если исходить из технических требований к процессу транспортировки и смешивания, то параметры траекторий частиц компонентов концормов должны быть номинальными (для максимального обеспечения выполнения данных требований), т. е. иметь определенные в этом смысле характеристики. Так, например, траектория их движения может быть спиралеобразной пространственной кривой с неравномерным шагом волновых движений и различным диаметром витков, на которую наложены колебания стохастического характера. В зависимости от геометрии наружной поверхности винтового барабана, т.е., от задания формы рабочей камеры, ее пространственной ориентации и совершающему сложному движению, в принципе, возможны и другие формы образования пространственных кривых перемещения частиц компонентов концормов. При этом, пространственная траектория каждой из перемещаемых частиц должна иметь достаточную протяженность (для технологического процесса смешивания).

Разумеется, такая задача не может быть решена чисто аналитически (с заданной степенью точности определения параметров, удовлетворяющих технологическому процессу), а требует комплексного подхода, с использованием экспериментальных данных и эмпирических зависимостей. Аналитическое решение данной задачи (даже в узком смысле – при определении параметров движения частиц компонентов концормов: текущих координат, скоростей и времени) явно затруднено без дополнительного наложения ограничений и принятых допущений. Как известно, значительное их количество может привести к неудовлетворительным результатам при решении поставленной задачи, к значительному снижению точностных характеристик. При построении тех или иных математических моделей (в данной задаче) может оказаться целесообразным привлечение эмпирических зависимостей и констант с целью наименьшего объема проводимых математических выкладок. Таким образом, при наложении тех или иных ограничений на протекающий процесс

транспортировки и смещивания можно сформулировать серии математических моделей решения данной задачи с той или иной степенью точности определения искомых параметров, например:

- модель сплошной среды;
- энергетическая модель;
- модель замкнутой среды со стохастическим процессом соударения частиц компонентов концкормов.

Как показал проведенный нами анализ этих моделей, применительно к винтовым барабанам и смещиванию в них частиц компонентов концкормов задачу по определению продольной скорости их перемещения, с целью получения в дальнейшем формул для конструкторов и производителей смесителей с использованием рабочих органов в виде винтовых барабанов нельзя решить только аналитически, требуется комплексный подход, с использованием экспериментальных данных и эмпирических зависимостей, поэтому, рассмотрим модель математической точки, как частицы компонентов концкормов движущейся во внутренней полости винтового барабана. Рассматриваемые винтовые барабаны, например Ц 7.7.1. или Ц 5.5.1. по периметру имеют явно выраженную трехходовую цилиндрическую винтовую линию (рисунки 3 и 4).

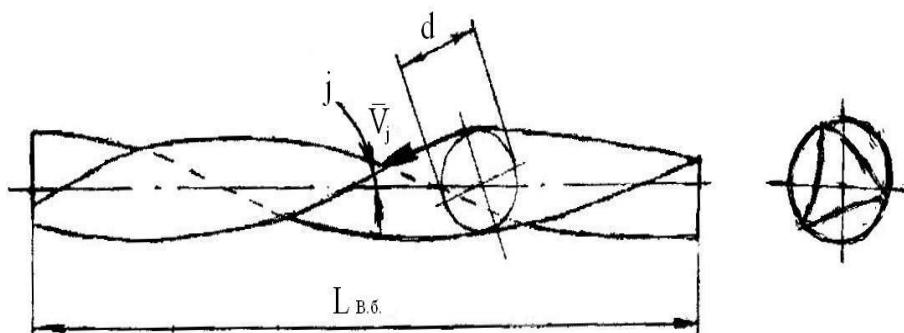


Рисунок 2 – Винтовой барабан Ц 7.7.1.

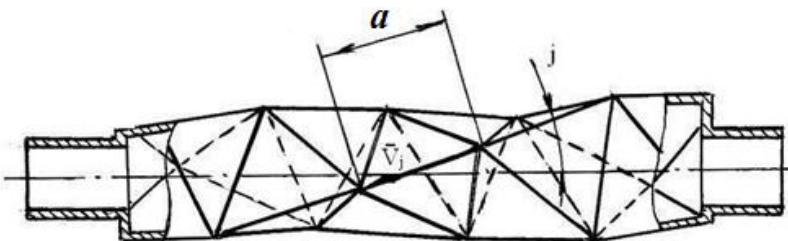


Рисунок 3 - Винтовой барабан Ц 5.5.1.

При вращении винтового барабана частицы компонентов концормов совершают сложное пространственное движение по трем винтовым линиям, непрерывно проходя вдоль его стенок. Если задаваться какой-то средней скоростью перемещения и временем смещивания (при перемещении с этой скоростью частиц компонентов концормов вдоль оси вращения винтового барабана), то можно оценить такой геометрический параметр винтового барабана как его длину  $L_{в.б.}$ .

Угол наклона образующей винтовой линии относительно оси винтовых барабанов  $j=Const$ , поэтому, для изучения процесса транспортирования и смещивания частиц компонентов концормов, его производительности рассматриваемые параметры классифицируются:

1. Неизменные угловые параметры винтового барабана, определяющие пространственную геометрию перемещаемых частиц компонентов концормов, где  $j=Const$  задает основную направленность этого перемещения, а поэтому, является основным угловым параметром.

2. Варьируемые линейные параметры:

$L_{в.б.}$  – длина винтового барабана.

Эти параметры являются сложными функциями от состояния кинематических параметров перемещения частиц компонентов концормов, времени транспортировки и смещивания  $t_{смеш.}$ .

Исходя из характера технологического процесса транспортировки и смещивания, время транспортировки и смещивания ( $t_{смеш.}$ ) должно быть оптимальным, что, безусловно, усложняет задачу определения параметров  $L_{в.б.}$ ,

следовательно и размеров винтового барабана в целом, так как должна решаться задача оптимизации процесса транспортирования и смешивания частиц компонентов концкормов в целом.

Для выявления качественной стороны процесса рассматриваемая задача определения параметра  $L_{в.б.}$  может быть сужена до следующей: варьируя временем транспортировки и смешивания частиц компонентов концкормов -  $t_{смеш.}$ , необходимо провести моделирование параметров некоторого условного (при определенных допущениях) движения частиц компонентов концкормов с целью получения аналитического выражения для описания этого движения. Характерной особенностью реального движения частиц компонентов концкормов является то, что при отсутствии разности давлений от каких-то посторонних внешних источников на входе-выходе винтового барабана перемещение будет вызвано одной активно действующей силой тяжести в направлении винтовых линий. С другой стороны, на изучаемое нами перемещение, определенное воздействие будут оказывать так называемые контактные силы- силы, образующиеся в результате соударения и обкатывания, а также трения между перемещаемыми частицами компонентов концкормов с поверхностью вращающегося винтового барабана. Нужно иметь ввиду, что контактные силы участвуют в непосредственном процессе транспортировки и смешивания, определяют время смешивания  $t_{смеш.}$ , так как интенсивность их воздействия зависит от угловой скорости вращения винтового барабана. Контактные силы имеют двояко выраженную природу:

- направленность – где участвуют совместно с силой тяжести в сложном пространственном движении частицы компонентов концкормов, образуя суммарное воздействие;

- стохастичность, где вдоль сложных пространственных траекторий контакты (обкатывания и соударения) носят случайный характер.

Разумеется, разграничить эту природу достаточно сложно, но необходимо, с точки зрения изучения реального процесса транспортирования и смешивания в двух направлениях: кинематическом и технологическом.

В заключении отметим, что на сложное пространственное движение частиц компонентов концкормов определяющее влияние при вращении винтового барабана оказывают угловые параметры, достаточно сложная пространственная геометрия углов, соединенных друг с другом, скрученных в винт полос, среди которых угол наклона образующей винтовой линии  $j=Const$  к оси вращения винтового барабана следует считать основным, потому что он определяет характер перемещения частиц компонентов концкормов вдоль трех винтовых линий. Представим себе, что нам, абстрактно, удалось  $j \rightarrow 0$  (свести к нулю), то при такой винтовой линии никакого бы продольного перемещения не было бы. Например, если рассматривать вращающуюся цилиндрическую поверхность винтового барабана, то какие бы по характеру силы не действовали в направлении, перпендикулярном оси вращения, продольного перемещения никакого бы не было, так как для вращающегося цилиндра  $j \rightarrow 0$ .

Если в пространстве (рисунок 4) задать правую тройку единичных векторов  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$ , где по правилу векторного произведения  $\bar{k} = \bar{i} \cdot \bar{j}$  определяет направление вращения вектора угловой скорости винтового барабана  $\bar{\omega} = \omega \cdot \bar{k}$ , то, как установлено из экспериментов, направление перемещения вдоль оси вращения винтового барабана частиц компонентов концкормов М происходит в противоположном направлении, т.е. в направлении  $-\bar{k}$ . Таким образом, если на векторах  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  строить соответственно оси пространственной неподвижной системы координат ХУZ, то составляющие проекций продольного перемещения скорости  $V_z < 0$ ,  $Z < 0$ . Направление  $V_j$  определено из опытов,  $\phi$  – угол поворота винтового барабана.

Исходя из сказанного выше, целесообразно, для изучения процесса движения частиц компонентов концкормов вдоль направления винтовых линий, заданных углами наклона  $j=const$ , исследовать поведение некоторой характеристики величину скорости перемещения частицы компонентов концкормов, например,  $V_j$ .

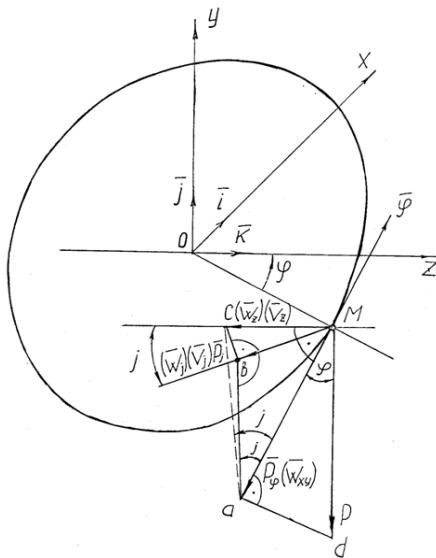


Рисунок 4 -Схема действия сил на частицу компонентов концкормов в винтовом барабане

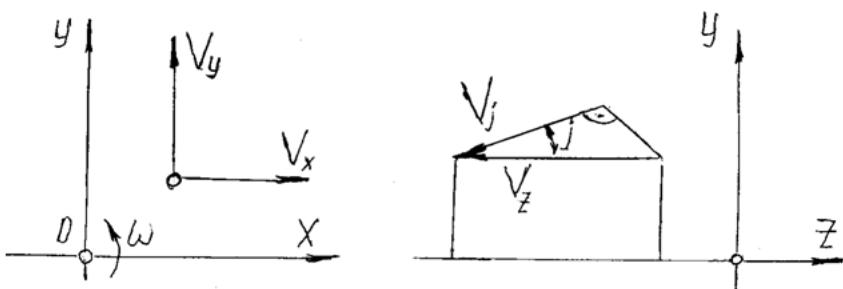


Рисунок 5- Схема направлений векторов скоростей частиц компонентов концкормов при их движении внутри винтового барабана

Тогда, как нетрудно видеть (рисунок 5) будет определена и другая характеристика:

$$V_j = V_Z \cdot \cos j \quad (1)$$

Для более детального анализа процесса движения частиц компонентов концормов во вращающемся барабане введем некую упрощенную модель «условного перемещения»: при вращении винтового барабана  $\omega$  условна материальная точка M- частица компонентов концормов переходит под воздействием сил (активной силы тяжести) япоследовательно с одной винтовой линии на последующую винтовую линию, скатывается вниз по направляющим винтовых линий, т.е., получает перемещение вдоль чередующихся винтовых линий, которое мы будем считать согласно этой условной модели непрерывным (во времени). Тогда, все непрерывные условные перемещения происходят под  $j$ - углами наклона относительно ф геометрической оси вращения винтового барабана и, если известен вектор ускорений  $W_{xy}$  (в плоскостях поперечных сечений) плоскости XYZ (рисунок 4), то образуется некоторое ускорение  $W_j$  перемещения вдоль направлений винтовых линий (в зависимости от значения  $j$  – угла наклона; очевидно при  $j = 0$  перемещений не было бы), которое может быть записано:

$$\bar{W}_j = W_{xy} \cdot \sin j , \quad (2)$$

где  $W_j = \frac{dV_j}{dt}$ .

Эта формула вытекает из простых физических соображений: вектор-составляющая силы веса

$$\bar{P}_\phi = -\bar{P} \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

будет проектироваться на  $j$  – направление по формуле

$$\bar{P}_j = \bar{P}_\phi \cdot \sin j . \quad (4)$$

Аналогично, по такой же зависимости, будут проектироваться и массовые силы трения, соударения.

Согласно 2-му закону Ньютона

$$\bar{W}_{xy} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \bar{F}_i , \quad (5)$$

где в  $\bar{F}_i$  входит и составляющая от силы веса  $\bar{P}_\phi$ ,

$\varphi$  – направление вращения точки M (частицы компонентов концормов) в плоскости XOY ;

$P$  – вес частицы компонентов концормов;

$P_\phi$  - составляющая  $P$  на  $\phi$ -направление,  $P_\phi = -P \cdot \cos \phi$  - величина данной составляющей на направление  $\phi$ .

Следовательно, и весь вектор  $\bar{W}_{xy}$  будет проектироваться на направление по зависимости:

$$\bar{W}_j = W_{xy} \cdot \sin j . \quad (6)$$

Заметим, что если нас интересует непрерывное перемещение (условное) вдоль оси вращения (в направлении, противоположном выбору оси  $Z$ , смотри рисунок 5), то можно записать:

$$\bar{W}_z = \dot{V}_z = \bar{W}_{xy} \cdot \operatorname{tg} j , \quad (7)$$

где  $V_z = \frac{V_x}{dt}$ .

Соотношение (7) непосредственно следует (смотри рисунок 5) из условия:

$$cM = aM \cdot \operatorname{tg} j \quad (8)$$

Соотношения (2) и (7), их совместность, следует трактовать в данной модели «условного перемещения» следующим образом: пусть векторы  $\bar{W}_z$ ,  $\bar{W}_{xy}$  проектируются таким образом на  $j$ -направление, что выполняется условие

$$\bar{W}_j = W_{xy} \cdot \operatorname{Sin} j \approx \bar{W}_z \cdot \operatorname{cos} j . \quad (9)$$

Из этих двух соотношений (условных до некоторой степени) непосредственно (после интегрирования), как нетрудно видеть, будет определена и другая характеристика (рисунок 6),

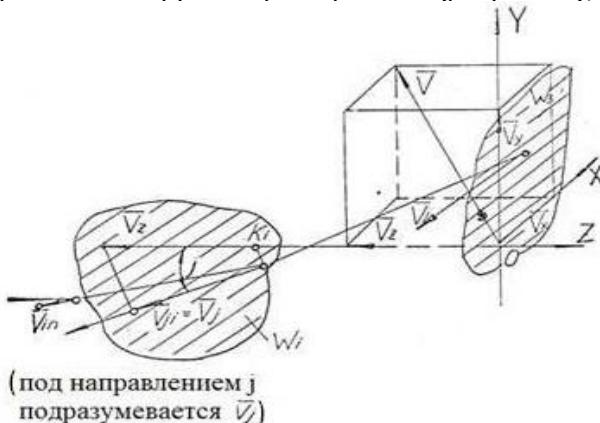


Рисунок 6 Схема расположения плоскостей действия сил на частицу компонентов концормов в винтовом барабан

$$V_j = V_z \cdot \cos j \quad \text{или} \quad V_z = \frac{V_j}{\cos j}, \quad (10)$$

т.е., установлена связь между величинами скоростей перемещений при условии  $t_0 = 0$ ,  $V_{j0} = V_{z0}$  для начальных условий. Заметим, что  $V_j < V_z$ , вытекающие из выражения (10), является условием «кратчайшего перемещения» вдоль направления винтовых линий.

На основании вышеизложенного можно сделать выводы о том, что при

$\rho = r = r_{cp} = \text{const}$ , полученная условная модель является частным случаем - случаем винтовой линии, обладающей, как известно, следующими свойствами:

1. Касательные (в данном случае следует иметь в виду  $V_j$  – вектора) образуют постоянный угол (имеется в виду  $j = \text{const}$ ) с некоторым неизменным направлением (в данном случае с осью винтового барабана).

2. Главная нормаль в винтовой линии во всех ее точках совпадает с нормалью к цилиндуру, на котором начерчена винтовая линия.

3. Вдоль винтовой линии отношение радиуса кривизны к радиусу кручения – величина постоянная.

4. Кратчайшее расстояние (в нашем случае перемещение) между двумя точками на цилиндре по винтовой линии проходит через эти точки (это свойство пожалуй и отражает  $V_j < V_z$  в нашей условной модели).

Таким образом, изучаемый (моделируемый условно) нами процесс (рисунки 5 и 7) следует исследовать:

- в плоскостях поперечных сечений ХОУ ( $W_3$ );
- в плоскостях мгновенных вращений  $W_i$ , где скорости  $V_z$  проектируются под постоянными углами на  $V_{ji}$ , – направление векторов:  $V_{ji}$ , – являются касательными векторами в каждой из точек винтовых линий, где через вектор  $V_j$  и точку  $K_i$  лежащую на оси вращения, проходит мгновенная плоскость  $W_i$ .

В этом случае, моделируемое движение является условным в том смысле, что его изучение сводится только к изучению движущихся в поперечной плоскости ХОУ частиц компонентов концормов во вращающемся винтовом барабане. Затем все параметры продольного движения (в частности и постоянства угла наклона винтовой линии к продольной оси винтового барабана.

Рассмотрим эту условность несколько подробней (рисунок 7).

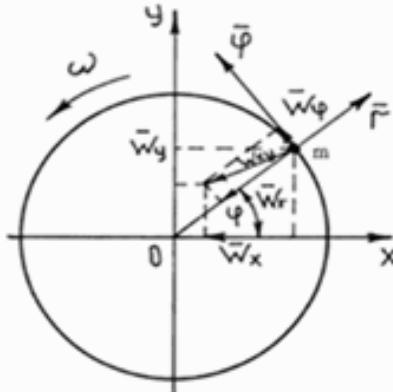


Рисунок 7- Схема движения частицы компонентов концормов

Если в плоскости ХОУ внести полярную систему координат  $(r, \phi)$ , то, как известно, система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m \cdot (\ddot{r} - r \cdot \dot{\phi}^2) = F_r \\ m \cdot (r \cdot \ddot{\phi} + 2 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\phi}) = F_\phi \end{cases} \quad (11)$$

где ( $r$  - некоторый выбранный радиус вращения в зависимости от меняющейся геометрии стенок врачающегося барабана в плоскости сечения ХОУ), в зависимости от характера моделируемых сил  $F_r$  и  $F_\phi$  может описывать любое движение (в данном случае это движение стеснено боковой поверхностью врачающегося винтового барабана), где под  $m$ -понимается масса моделируемых частиц компонентов концормов в виде условно движущихся материальных точек (в данном случае:  $m_1$  – масса частицы компонентов концормов в виде материального шара радиуса  $r_1$ ;  $m_2$  – масса частицы компонентов концормов

в виде материального шара радиуса  $r_2$ ),  $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ ,

$$\ddot{r} = \frac{d\dot{r}}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}, \dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}, \ddot{\phi} = \frac{d\dot{\phi}}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2}.$$

Пусть  $\ddot{X} = \ddot{X}(r, \varphi, \dot{r}, \dot{\varphi}, \ddot{r}, \ddot{\varphi})$ ,  $\ddot{Y} = \ddot{Y}(r, \varphi, \dot{r}, \dot{\varphi}, \ddot{r}, \ddot{\varphi})$  - величины ускорений М – точки по каждой из координатных осей плоскости  $x0y$ , где величина общего ускорения ( $W_{xy}$ ):

$$W_{xy} = \sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2}$$

Тогда, в данном случае, величина  $W_z$  – ускорения точки М вдоль оси  $Z$ , которую условно обозначим  $\ddot{Z}$ , равна:

$$\ddot{Z} = \dot{V}_z = W_{xy} \cdot \operatorname{tg} j < 0 \quad (12)$$

Следовательно, становится известным движение продольного перемещения. Перемещение происходит вдоль продольной оси винтового барабана в противоположном направлении оси  $Z$ , т.е., все характеристики продольного движения  $\dot{V}_z, V_z, Z < 0$ , если оси системы  $xuz$  координат образуют правую тройку векторов относительно неподвижного пространства полости винтового барабана. В этом заключен смысл условности изучения этих движений, так как становится известным общее ускорение сложного пространственного движения вдоль винтовых линий врачающегося винтового барабана частиц сыпучих материалов (условное ускорение).

$$W = \sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2 + \ddot{Z}^2} \quad (13)$$

Даже при такой упрощенной условной схеме интегрирование зависимостей явно затруднено, поэтому в целях изучения качественной стороны этого процесса дополнительno упростим

$$r = r = \text{const} \quad (14)$$

тогда, из левой части второго уравнения системы (11) и условия (12) следует:

$$\dot{V}_z = r \cdot \operatorname{tg} j \cdot \dot{\varphi} \quad (15)$$

После интегрирования находим продольную скорость перемещения частиц компонентов концормов  $V_z$ :

$$V_z = (r \cdot \operatorname{tg} j \cdot \dot{\varphi} + C) < 0$$

или

$$V_z = r \cdot \operatorname{tg} j \cdot \omega + C \quad (16)$$

Как показали проведенные нами исследования, скорость процесса движения частиц компонентов концкормов в винтовых барабанах в диапазоне частот от 0 до 30 об/мин незначительна, а свыше 90 об/мин скорость движения частиц концкормов снижается, поэтому достаточно и целесообразно получить зависимости (расчетные формулы) для определения скорости их продольного перемещения в диапазоне частот вращения от  $n= 30$  об/мин до  $n= 90$  об/мин. Поэтому, введя в постоянную  $G$ , которая выражена через характеристики винтовых барабанов

$$G = r \cdot \operatorname{tg} j \text{ (м),} \quad (17)$$

получим уравнение для определения продольной скорости перемещения частиц компонентов концкормов в винтовых барабанах удобное для инженерных расчетов при проектировании смесителей при частоте вращения винтовых барабанов от 30 до 90 об/мин:

$$V = G \cdot \omega + C \text{ (мм/с),} \quad (18)$$

где  $C$  – постоянная, которая выражает характеристики технологического процесса смешивания, например: коэффициент заполнения винтового барабана  $K_v$ ; угол наклона оси вращения винтового барабана  $\theta$ ; угол уклона (конусность) стенок винтового барабана  $a$ .

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать вывод о существенных улучшениях ресурсосберегающих характеристик предлагаемой технологии и комплекта оборудования приготовления концкормов с использованием технологии и оборудования ударно-волновых процессов.

Новизна заключается в том что:

-такое конструктивное оформление винтовых барабанов позволяет обеспечить в них ударно-волновой процесс осевого движения компонентов концкормов от загрузки к выгрузке при горизонтальном расположении оси вращения вращающегося барабана, что упрощает эксплуатацию, в связи с отсутствием его уклона;

-благодаря внутренним винтовым поверхностям двоякой кривизны векторы скорости движения компонентов

концормов при транспортировке их от загрузки к выгрузке изменяются, что способствует интенсификации процесса приготовления концормов и расширяет технологические возможности;

-внутри винтового барабана со сложной внутренней поверхностью в виде сочетания двух криволинейных поверхностей, в каждой точке возникают разнонаправленные составляющие движения, что позволяют не только сократить габариты вращающегося барабана в 2– 3 раза, но и обеспечить значительное улучшение энергосберегающих характеристик.

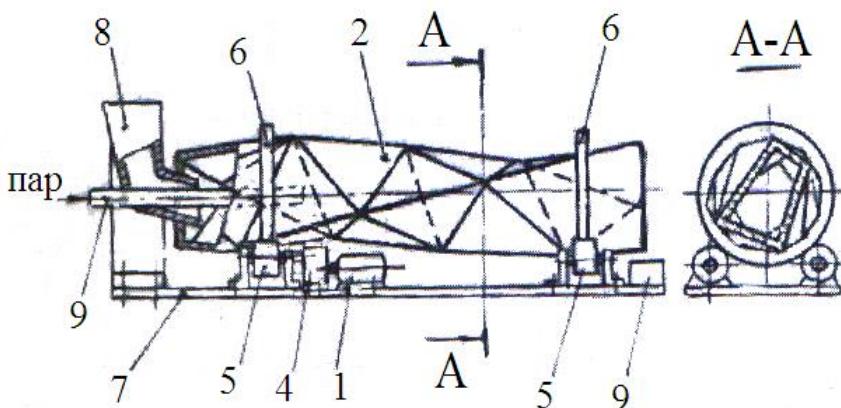


Рисунок 8 – Смеситель для смешивания компонентов концормов на базе винтового барабана Ц 5.5.1.

Техническая характеристика смесителя на базе винтового барабана

Производительность, кг/ч.....10000

Мощность электродвигателя, кВт.....11

Габаритные размеры, мм.....3200x1100x1050

Масса, кг.....1800

На рисунке 8 показана предлагаемая типовая схема смесителя на базе винтового барабана Ц 5.5.1. рассчитанного по разработанной методике расчета оборудования для смешивания компонентов концормов.

- 
1. Марченко, А.Ю. Ресурсосбережение при смешивании компонентов кормов в винтовых барабанах / А.Ю. Марченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 4. – С. 20–21.
  2. Марченко, А.Ю. Винтовые барабаны (Смешивание сыпучих материалов): монография / А.Ю. Марченко, В.В. Цыбулевский, Г.В. Серга. – Издательский центр КубГАУ, 2008. – 460 с.
  3. Марченко, А.Ю. Научно-технические основы создания ресурсосберегающих машинных технологий приготовления кормов в винтовых барабанах / А.Ю. Марченко // Научный журнал. Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар, 2008. – С.184–190.
  4. Марченко А.Ю. Совершенствование процессов движения сыпучих материалов с большой амплитудой / А.Ю. Марченко // Вибрационные машины и технологии : сб. науч. тр. Курск Гос. Техн. Ун-т. – Курск, 2008. – С. 117–127.

**УДК 621.8+06**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ  
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ**

Колесников И.В.

РГУПС, г. Ростов-на-Дону, Россия

Акустические параметры материалов (скорость распространения упругих волн, затухание и дисперсия, акустический импеданс) связаны с механическими свойствами материалов. В этой связи изменение механических параметров поверхностного слоя твердого тела можно контролировать с помощью ультразвуковой поверхностной волны с перпендикулярной поляризацией, которую называют волной Рэлея [1]. Энергия этой волны в основном локализуется в поверхностном слое толщиной, равной длине волны  $\lambda$ . Для измерения твердости с помощью генератора импульсов возбуждается пьезопреобразователь. Возникающий при этом акустический импульс проходит поверхность контролируемого изделия, а затем принимается преобразователем, усиливается и подается на вертикальный вход осциллографа, развертка которого запускается через линию задержки зондирующими импульсом. Затем по тарировочным таблицам и данным характеристик поверхности акустической волны определяют величину твердости. В металлополимерных трибосистемах антифрикционного назначения мы часто наблюдаем

образование пленки переноса на металлическом контроле. Наличие тонкого слоя не только изменяет параметры рэлеевской волны на металле, но допускает также распространение волны другого типа – волны Лява [1].

Что касается измерения температуры, то в настоящее время температуру трущихся тел в большинстве случаев определяют посредством ее преобразования в иную физическую величину, поддающуюся количественной оценке, так как непосредственное измерение температуры как физической величины не представляется возможным.

В практике измерения температур трущихся сопряжений наиболее широкое распространение нашли искусственные термопары, замеряющие температуру в диапазоне (-100...2500 °C). К недостаткам таких термопар можно отнести, во-первых, их инерционность и, во-вторых, неспособность замерять температуру непосредственно на поверхности трения.

Измерение температур естественной термопарой осложнено ее тарировкой. Кроме того, погрешность измерения связана со скачками токов, обусловленных вспышками мгновенных температур и нарушением контакта при скольжении из-за различия контурной и номинальной площадей касания.

В экспериментальной практике для контроля температуры нашли применение термопары сопротивления, термокраски, легкоплавкие индикаторы, методы термоэлектронной эмиссии, радиационной пиromетрии, структурной диагностики и др.

Для развития представлений о механизмах процессов, протекающих в поверхностных слоях трибосопряжений, необходима разработка методов термодиагностики в двух направлениях – измерение поверхностной температуры и ее изменения по нормали к поверхности трения – температурного градиента.

Для определения поверхностной температуры трущихся тел наиболее перспективна бесконтактная диагностика радиационными пиromетрами, а для измерения температурных градиентов – метод, основанный на использовании поверхностных акустических волн (ПАВ), энергия которых сосредоточена в поверхностном слое.

Что же касается диагностики профиля температуры с

помощью акустоэлектронной системы, то для оценки температурного поля в поверхностном слое трибосопряжения разработана методика послойного прецизионного измерения скорости и затухания этих волн [2]. Для этого на возвратно-поступательной машине трения (см. рисунок) устанавливается опора со звукопроводом 4, выполняющим роль поверхности трения. На правом и левом концах звукопровода крепятся клиновидные пьезоэлектрические преобразователи 3 с пьезопластиной 2. Под действием электрического сигнала от генератора 1 преобразователь возбуждает объемную волну, которая распространяется со скоростью  $V_{об}$  в направлении поверхности звукопровода и при контакте с ним трансформируется в поверхностную акустическую волну.

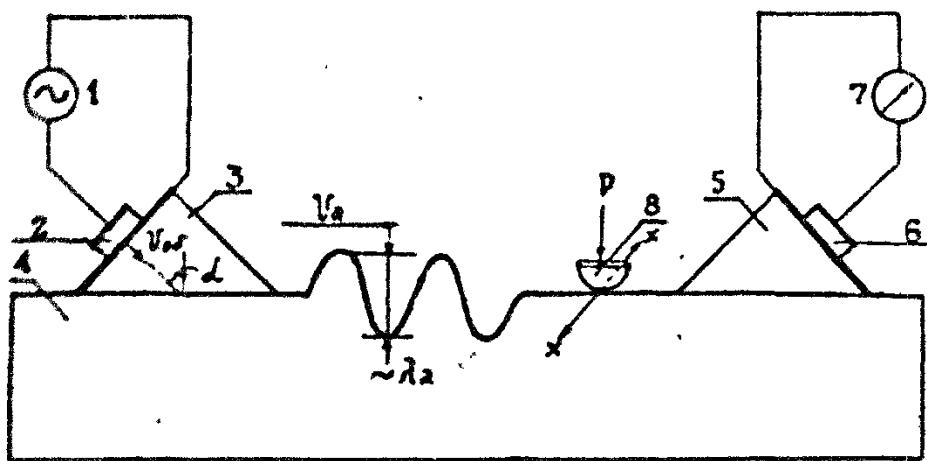


Схема измерения температурного профиля с помощью клиновых преобразователей ПАВ

Заметим, что скорости объемной волны  $V_{об}$  в клине 3 и поверхностной акустической волны  $V_a$  в звукопроводе 4 определяются физическими свойствами материала. Эффективное возбуждение поверхностной волны происходит при соотношении

$$\sin \alpha = \frac{V_{об}}{V_a}, \text{ т.е. угол падения волны } \alpha \text{ выбирается таким}$$

образом, чтобы проекция вектора скорости объемной волны в клине на поверхность звукопровода численно была равна модулю вектора скорости поверхностной волны. Тогда пространственный период упругих деформаций на нижней поверхности клина равен длине поверхностной акустической волны в звукопроводе. Этим обусловлена эффективная трансформация объемной волны в поверхностную, которая на выходе устройства трансформируется в объемную с помощью клиновидного пьезоэлектрического преобразователя 5, а затем с помощью пьезопластины 6 – в электрический сигнал, регистрируемый осциллографом 7.

Перпендикулярно направлению распространения поверхностной волны возвратно-поступательно перемещается контртело 8. При изменении граничных условий (нагрузки, скорости, теплоотдачи) меняется температурное поле в звукопроводе, что приводит к возникновению неоднородно возмущенного поверхностного слоя. При этом имеет место достаточно высокая корреляция между формой кривой дисперсии поверхностной волны и свойствами этого слоя. В результате изменения относительных полос пропускания резонансных пиков получаем частотную зависимость добротности и, соответственно, погонного затухания. Эта частотная зависимость и дает нам информацию об изменении температурного поля по глубине. Действительно, энергия поверхностной волны Рэлея локализована в слое толщиной  $\lambda \dots 1,5\lambda$  и, следовательно, глубина проникновения волны зависит от ее частоты. Таким образом, меняя частоту возбуждения поверхностной волны, мы получаем картину распределения температурного поля в поверхностном слое. Причем для количественной оценки температурного поля предварительно строились тарировочные графики, устанавливающие связь между показателями прибора и температурой, а затем уже проводились измерения при трении.

Испытания проходили при нагрузке на индикатор  $P = 0,5 \dots 2,0$  МПа теплоотдаче (за счет охлаждения воздухом, углекислым газом различной интенсивности). Материалом для звукопровода служила сталь 45, а для индентора – композиционный полимерный материал на основе волокон из ПТФЭ. Температура поверхности трения замерялась

инфракрасным пирометром.

В результате исследования установлено, что с увеличением теплоотдачи путем интенсивного охлаждения узла трения (воздухом или углекислым газом) при неизменных нагрузочно-скоростных параметрах трения максимальное значение поверхностной температуры  $T_{пов}$  снижается, а величина температурного градиента  $gradT$  растет, что подтверждает результаты эксперимента, описанные в работе [2]. Так, при охлаждении воздухом имеем  $T_{пов} = 338$  К,  $gradT = 2 \cdot 10^4$  град/м, а при охлаждении углекислым газом  $T_{пов} = 320$  К, а  $gradT = 3 \cdot 10^4$  град/м.

Кроме того, в зависимости от условий эксплуатации и теплоотвода зона максимальной температуры находится на разном расстоянии от поверхности трения. Местоположение этой зоны удаляется от поверхности с уменьшением интенсивности поверхностного источника и увеличением теплоотдачи с поверхности трения.

Следует отметить, что распространение упругой волны в твердом теле сопровождается ее затуханием – убылью амплитуды колебаний. Это, прежде всего, обусловлено потерями колебательной энергии в среде и рассеянием на неоднородностях среды. Поглощение, обусловленное сдвиговой вязкостью материала и теплопроводностью среды, называют классическим. Поглощение, обусловленное объемной вязкостью, связано с релаксационными процессами.

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПОЛНЕНО ЗА СЧЁТ ГРАНТА РОССИЙСКОГО НАУЧНОГО ФОНДА (ПРОЕКТ №14-29-00116)**

---

1. Ботаки А.А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов // А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Ширко. – М. : Машиностроение, 1981. – 80 с.

2. Колесников, В.И. Теплофизические процессы в металлокомпозитных трибосистемах / В.И. Колесников. – М. : Наука, 2003. – 279 с.

**УДК 621.9.048.6:621.794**

## **ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАЛИ ГАТФИЛЬДА ОБЪЁМНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

*Пинахин И. А., Черниговский В. А., Ягмурев М. А.*

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь,  
Россия

В настоящее время известно большое количество методов упрочнения материалов, большинство из которых носят поверхностный характер упрочнения. К таким методам относятся: нанесение покрытий, дробеструйная обработка, лазерная поверхностная обработка с использованием лазеров непрерывного или импульсного действия и др. Магнитно-импульсное упрочнение и термическая обработка позволяют улучшать физико-механические свойства материалов по объему, но данные методы являются энергоемкими и трудоемкими. Кроме того, следует отметить, что некоторые методы могут упрочнять не все материалы.

Землеройные и землеройно-транспортные машины, работоспособность которых в значительной степени зависит от объемной прочности и абразивной износостойкости материала их рабочих органов применяются в различных сферах деятельности. Около 15% времени работы землеройных и землеройно-транспортных машин расходуется на замену их ножей, зубьев ковшей и т. п. Для повышения величины технического ресурса режущие кромки рабочих органов землеройных машин изготавливают из высокопрочных и износостойких материалов, в том числе зарубежного производства, стоимость которых в 5 раз выше отечественных аналогов (при этом отечественные стали уступают по прочности и износостойкости и требуют обязательного упрочнения).

Из вышесказанного следует, что целесообразным является применение методов упрочнения, которые бы позволили улучшать физико-механические свойства износостойких материалов по объему при наименьших затратах времени и средств. К таким методам относится предлагаемый нами метод объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) режущих инструментов, разработанный на кафедре «Технология машиностроения и технологическое оборудование» Северо-Кавказского федерального университета.

Объемное импульсное лазерное упрочнение осуществляется путем локального однократного облучения лучом неодимового лазера импульсного действия ГОС 1001 при следующих режимах: энергия импульса 200 – 400 Дж, длительность импульса  $0,8 \cdot 10^{-3}$  с, диаметр луча лазера 1,4 – 2,5 мм. В результате воздействия импульса лазера материал нагревается до температуры  $40 \cdot 10^3$  –  $60 \cdot 10^3$  К (происходит переход в состояние плазмы), что приводит к испарению материала (20 – 70 мг в зависимости от режимов облучения) и образованию ударной волны (рисунок 1). Возникновение и прохождение ударной волны в материале было подтверждено результатами тензометрии и рентгеноструктурного анализа [1].

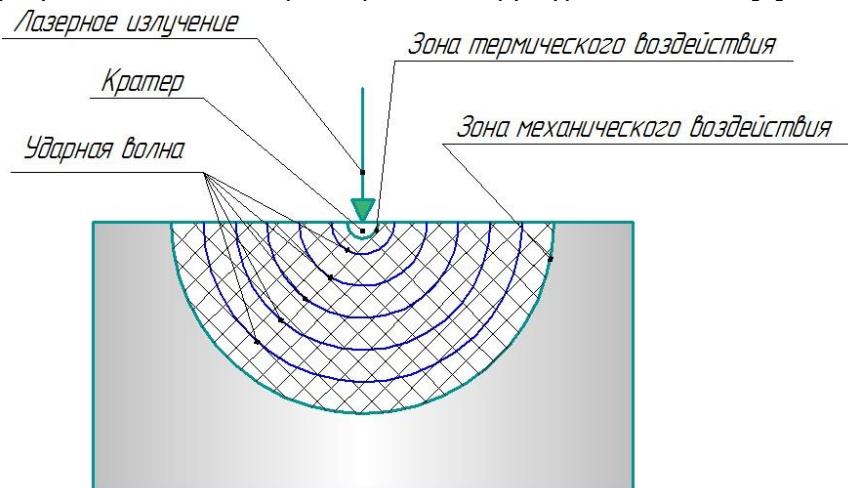


Рисунок 1 – Схема процессов, развивающихся в материале при ОИЛУ

Для обоснования исследований влияния ОИЛУ на износостойкие стали, в первую очередь была поставлена задача изучения воздействия упрочнения на их фазовые составляющие. В качестве материала для испытываемых образцов было выбрана износостойкая аустенитная сталь 110Г13Л ГОСТ 977-88 (сталь Гатфильда), из слитка которой были вырезаны цилиндрические образцы размером 10×20 миллиметров. После этого образцы прошли закалку при  $1100^{\circ}\text{C}$  с охлаждением в воде и средним отпуском  $400^{\circ}\text{C}$ .

Облучение образцов проводилось на лазере ГОС 1001 при следующих рабочих режимах: длина волны  $1,064 \cdot 10^{-6}$  м, продолжительность импульса  $0,8 \cdot 10^{-3}$  с, диаметр луча лазера  $1,2 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, полезная энергия облучения 100 – 300 Дж (плотность мощности облучения  $10^{10} - 1,3 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>) (риунок 2).



Рисунок 2 – Схема ОИЛУ образцов для проведения рентгеноструктурного анализа

После облучения проводился рентгеноструктурный анализ образцов на рентгеновском дифрактометре «ARL Xtra». Результаты позволили выявить экстремум изменения структуры образцов, который соответствует диаметру луча лазера  $d = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м, полезной энергии облучения  $E = 200$  Дж (плотность мощности облучения  $9,8 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>). На рисунке 3 показано изменение ширины рентгеновских дифракционных линий аустенитной фазы стали 110Г13Л [2].

Как видно из рисунка 3 наблюдается уширение рентгеновских дифракционных линий аустенитной фазы стали 110Г13Л. Как известно, сталь Гатфильда обладает повышенной способностью к наклепу, что проявляется в большем измененииnanoструктуры при одинаковой степени деформации по сравнению с другими аустенитными сталями. Нами было установлено, что в результате ОИЛУ для стали 110Г13Л происходит уменьшение размеров блоков мозаики в 1,04 – 1,26 раза, увеличение плотности дислокаций в 1,05 – 1,22 раза, повышение степени микрискажений кристаллической решетки в 1,04 – 1,28 раза. Т. е. налицо все признаки повышения степени дефектности материала или наклепа.

Таким образом, на основании вышесказанного можно сделать предварительный вывод об упрочнении износостойкой стали 110Г13Л объемным импульсным лазерным упрочнением.

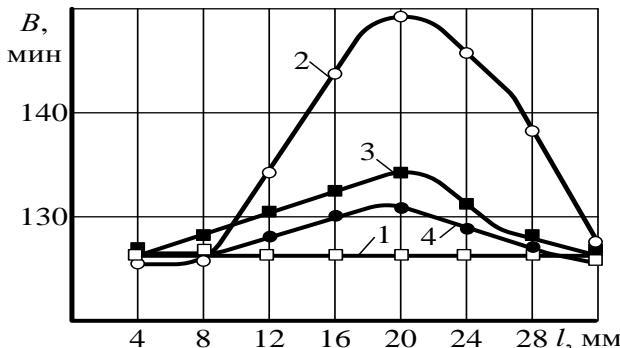


Рисунок 3 – Изменение ширины линий аустенитной фазы стали 110Г13Л в зависимости от расстояния от места облучения при разных режимах ОИЛУ: 1 – исходные образцы; 2 –  $E = 200$  Дж,  $d = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $E = 150$  Дж,  $d = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $E = 250$  Дж,  $d = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м

1. Pinahin I. A., Toeskin S. A., Yagmurov M. A., Salmanova D. A. Influence of by volume impulsive laser work-hardening on durability of carboloies // 3rd International Scientific and Practical Conference «Science and Society» – SCIEURO, London, 2013. – №1. – С. 50-58.

2. Пинахин И. А., Ягмурев М. А., Пинахин А. И. Повышение физико-механических свойств конструкционных сталей методом объемного импульсного лазерного упрочнения // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – Муром, 2012. – №4. – С. 58-62.

**УДК 62/002:539.3(075.8)**

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ УПРОЧНЕННОГО В УСЛОВИЯХ УДАРНО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Лебедев В.А, Соколов В.Д, Штынь С.Ю.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия*

В процессе ППД происходит упрочнение поверхностного слоя, что предопределяет главное технологическое назначение методов ППД и их место в технологии изготовления деталей машин.

Современные достижения физики, многочисленные теоретические и экспериментальные исследования методов ППД, позволяют дать структурно-энергетическую интерпретацию процессу ППД, положив в его основу термодинамическую теорию прочности и разрушения твердых тел, из которой следует, что ответственной за упрочнение поверхностного слоя (ПС) является величина потенциальной (скрытой) энергии накапливаемой в нем в процессе ППД [ 1 ].

В качестве основных физико-механических характеристик упрочненного поверхностного слоя, определяющих его прочностные свойства и как следствие эксплуатационные свойства деталей, выделяют микротвердость, остаточные напряжения, глубину упрочненного слоя. Основные физико-механические характеристики прочности поверхностного слоя деталей устанавливают или в результате механических испытаний или путем применения методов разрушающего контроля. Однако в последние годы в связи с появлением более совершенных методов и средств определения физико-механических свойств решающую роль начинают играть неразрушающие методы оценки повреждаемости деталей.

Развитие неразрушающих методов контроля и прогнозирования физико-механических свойств деталей идет по двум направлениям – экспериментальному и теоретическому. При этом оба направления опираются на параметры различного рода, характеризующие состояние повреждаемости материала и критерии разрушения. Активизация развития этих методов предопределяется тем, что между механическим состоянием детали в конструкции изделия и комплексом его физических свойств поверхностного слоя существует тесная взаимосвязь. При этом, чем лучше физико-механические характеристики качества поверхностного слоя детали коррелируют с его механическим состоянием в конструкции изделия, тем с большей достоверностью можно определить и предсказать механических свойств изделия и его конструктивных элементов без их разрушения. Следовательно, современные методы неразрушающего контроля и прогнозирования должны основываться на установлении корреляционной связи физико-механических характеристик качества ПС с его объемной повреждаемостью материала в процессе упрочняющей

обработки методами ППД. В этой связи особое значение имеет задача по изучению в процессе ППД таких термодинамических свойств материала как плотность накапливаемой в деформируемых объемах упрочненного поверхностного слоя скрытой энергии, интегрально и однозначно характеризующей его структурное состояние и степень повреждаемости.

Следует отметить, что наиболее обобщенной характеристикой прочности пластически деформированного поверхностного слоя является твердость. О связи между твердостью, напряжениями и деформациями говорит тот факт, что при измерении твердости вдавливанием выявляется не особое механическое свойство материала, а сопротивление поверхностного слоя пластической деформации.

К настоящему времени получены экспериментальные данные о связи между твердостью и напряжениями течения в условиях простейших напряженных состояний – растяжения, сжатия, кручения, что позволяет установить корреляционную связь и предложить метод оценки по твердости структурных параметров упрочненного ППД поверхностного слоя и наоборот.

В соответствии с энергетическими представлениями процесса ППД, термодинамической теорией прочности и разрушения твердых тел основными параметрами, характеризующими структурное состояние материала, его наследственные свойства – предысторию нагружения, являются начальная плотность скрытой энергии  $E_0$  материала в исходном (до деформирования) состоянии и степень перенапряжения на межатомных связях оцениваемая коэффициентом  $K_\sigma$ . Знание этих структурных параметров необходимы для расчетно-аналитической оценки (прогнозирования) физико-механических характеристик поверхностного слоя упрочненного методами ППД.

Для оценки исходной плотности скрытой энергии  $E_0$  необходимо установить зависимость интенсивности напряжения  $\sigma_i$  от твердости. Результаты статистической обработки экспериментальных данных, приведённые в работе [2], позволяют представить обобщенную зависимость между твердостью и интенсивностью напряжения в виде

$$\sigma_i = 0.067HV^{1.2} \quad (1)$$

где  $HV$  – твердость материала по Виккерсу.

О высокой степени универсальности полученной формулы свидетельствует высокой коэффициент корреляции  $r=0,956$ .

Установленный характер зависимости интенсивности напряжений от твердости  $HV$  представляет интерес с позиций возможности прогнозирования повреждаемости поверхностного слоя при ППД, а также для определения предельного значения твердости упрочненного слоя  $HV_{pc}^*$ , при которой достигается наибольший эффект упрочнения с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей.

В соответствии с теорией дислокаций между плотностью скрытой энергии  $E$  и интенсивностью напряжений  $\sigma_i$  существует взаимная связь

$$\sigma_i^2 = 6GE/K_\sigma^2, \quad (2)$$

где  $G$  – модуль сдвига.

Учитывая, что интенсивность напряжений  $\sigma_i$  связана с твердостью  $HV$  соотношением (1), а  $K_\sigma$  с достаточной степенью точности определяется по следующей формуле [2]:

$$K_\sigma = \frac{1}{1.2 \cdot 10^{-3} + 6.47 \cdot 10^{-6} HV},$$

то из выражения (2) получим зависимость для оценки плотности скрытой энергии, накапливаемой в ПС при ППД в виде

$$E = M \cdot HV_{pc}^{2.4}, \quad (3)$$

$$\text{где } M = \frac{1}{6G} \left( \frac{1}{1.2 \cdot 10^{-3} + 6.47 \cdot 10^{-6} HV} \right)^2;$$

$HV_{pc}$  – твердость ПС после механической обработки.

Согласно структурно-энергетический интерпретации процесса ППД наибольший эффект упрочняющей обработки достигается когда плотность накопленной в поверхностном слое обрабатываемого материала скрытой энергии  $E$  достигает предельно величины  $E^*$ . Тогда по уравнению (3) предельно допустимое значение твердости упрочненного слоя, с точки зрения влияния его на эксплуатационные свойства деталей будет равно

$$HV_{pc}^* = (E^*/M)^{0.42}.$$

Используя аналогию между процессами механического и термического упрочнения, в качестве энергетического критерия эффективности упрочнения поверхностного слоя методами ППД может быть принята величина предельной плотности скрытой энергии, запасенной в локальном микрообъеме поверхностного слоя. Установлено, что критическое значение плотности скрытой

энергии  $E^*$  хорошо коррелирует с известной термодинамической характеристикой металлов, определяемой как разность энталпии данного материала в твердом состоянии при температуре плавления и энталпии при  $293^0K$ . Поэтому выражение для оценки предельно допустимой твердости, упрочненного в процессе ППД поверхностного слоя, можно представить в виде

$$HV_{pc}^* = [(H_{TS} - H_{293})/M]^{0.42},$$

где  $H_{TS}$  - энталпия материала детали в твердом состоянии при температуре плавления,  $H_{293}$  - энталпия материала при нормальных условиях ( $293^0 K$ ).

Проведенные исследования показали, что энергетические параметры упрочненного ППД поверхностного слоя  $E_\sigma, E^*, K_\sigma$  можно довольно просто определить по известным значениям твердости материала  $HV$  в исходном состоянии. Установление корреляционных связей между плотностью скрытой энергии накапливаемой в упрочненном поверхностном слое  $E$  и твердостью  $HV_{pc}$ , твердостью и физико-механическими характеристиками упрочняемого поверхностного слоя дают возможность с позиций энергетического подхода, прогнозировать качество поверхности и, как следствие эксплуатационные свойства деталей подвергаемых в процессе изготовления упрочняющей обработке динамическими методами ППД.

---

1.Лебедев В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования: монография / В.А. Лебедев – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007 – 156 с.

2.Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел / Федоров В.В. – Ташкент: Издательство ФАН, 1985-168 с.

**УДК621.99**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ  
НАГРУЖЕНИИ ИНСТРУМЕНТА**

*Афонин А.Н.*

НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия

В современной промышленности нашли широкое применение способы обработки материалов пластическим деформированием, занимающие промежуточное положение между обработкой поверхностным пластическим деформированием (ППД) и объемной обработкой давлением. К ним относятся различные способы накатывания на поверхности детали различных профилей: резьб, шлицев, зубьев, кольцевых канавок и т.д. При обработке изделий данными методами пластической деформации подвергается лишь поверхностный слой деформируемого тела, однако при этом имеет место существенное изменение его формы путем образования на поверхности тела периодически повторяющихся или единичных выступов и впадин. В связи с этим их можно выделить их в отдельную группу: поверхностное пластическое формообразование.

Существующие способы поверхностного пластического формообразования реализуются, как правило, со статическим нагружением инструмента. При этом, для формообразования крупных резьб, шлицев и других профилей требуется прикладывать значительные усилия. Значительно повысить эффективность поверхностного пластического формообразования можно за счет комбинированного нагружения инструмента статической и динамической (ударной) нагрузкой. Благодаря импульсному воздействию можно создавать значительные напряжения в пятне контакта инструмента и заготовки при сравнительно небольшой затраченной мощности, а статический поджим способствует более полной передаче энергии деформирующего импульса в обрабатываемую среду.

Поверхностное пластическое формообразование с комбинированным нагружением инструмента - статико-импульсная обработка (СИО), позволяет достигать глубину

упрочнения до 10 мм и более при степени упрочнения 100 % и более [1]. Важной особенностью СИО является возможность формирования поверхностного слоя с гетерогенным упрочнением. Чередование в подобном слое высоко упрочненных твердых участков с менее упрочненными вязкими способствует торможению микротрещин и повышению усталостной прочности материала. Равномерность упрочнения зависит от коэффициента перекрытия отпечатков. При небольших значениях коэффициента перекрытия поверхность получается недостаточно упрочненной, а при слишком больших возникает переупрочнение. Необходимое значение коэффициента перекрытия достигается варьированием частоты деформирующих импульсов и скорости подачи. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в ряде случаев рационально выбранное гетерогенное упрочнение может повысить усталостную прочность в 2 и более раза [1, 3].

Поверхностное пластическое формообразование с комбинированным нагружением инструмента в настоящее время изучено недостаточно. Методики выбора рациональных режимов отсутствуют. Для каждого материала и конфигурации заготовки эти режимы будут различными. Ввиду сложности характера пластической деформации при поверхностном пластическом формообразовании теоретическое исследование данного процесса аналитическими методами теории пластичности весьма затруднительно. Его экспериментальные исследования крайне трудоемки и дорогостоящи. В связи с этим для исследования данных методов обработки представляется перспективным использование современных численных методов математического моделирования, в частности метода конечных элементов (МКЭ) с использованием современных программных продуктов, например системы DEFORM [2, 4].

Для моделирования таких сложных видов обработки, как поверхностное пластическое формообразование с комбинированным нагружением инструмента, важным является задание корректных начальных и граничных условий. Заготовка при моделировании сохраняет неподвижность, а все движения сообщаются инструменту. Так как к одному инструменту не могут быть одновременно приложены граничные условия в виде сил (деформирующие импульсы и статическое нагружение) и

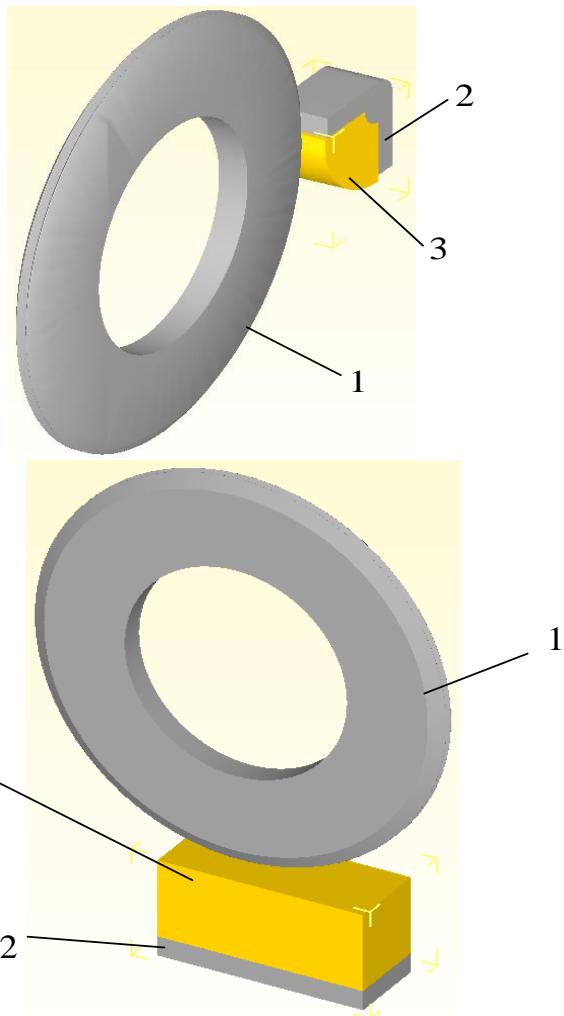
перемещений (движение подачи), для сообщения деформирующих импульсов применяется фиктивный инструмент, имеющий неразрывный контакт с заготовкой (рис. 1). Заготовка принимается идеально пластичной. Механические свойства материала заготовки задаются мультилинейной кривой упрочнения. В качестве критерия разрушения материала используется встроенный в систему нормализованный критерий Кокрофта – Лейтема.

Нагрузка, прилагаемая к фиктивному инструменту, является функцией времени и соответствует по своим параметрам реальным деформирующими импульсам, генерируемым технологическим оборудованием, например пролонгированным импульсам гидравлического генератора [1], имеющим головную и хвостовую части.

В качестве примера приведем результаты моделирования СИО резьбы M24x2 на заготовке из стали 45. На рис. 2 приведены поля эквивалентных деформаций в заготовке при различном перекрытии отпечатков. На рис. 3 показано распределение эквивалентных деформаций под упрочненной поверхностью на глубине 0,2 мм. Полученные результаты с достаточной степенью точности соответствуют результатам экспериментальных исследований. Картина напряженно-деформированного состояния заготовки близка к реальной [1, 5].

На приведенных иллюстрациях хорошо видна неравномерность упрочнения поверхностного слоя при СИО. Количественно равномерность упрочнения может быть определена по графику, изображенному на рис. 3, используя понятие опорной длины кривой упрочнения (по аналогии с опорной длиной шероховатости на профилограмме [3]).

Компьютерное моделирование процессов поверхностного пластического формообразования с комбинированным нагружением инструмента позволяет подбирать энергию и частоту деформирующих импульсов и скорость подачи, обеспечивающие требуемую степень, глубину и равномерность упрочнения, без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.



1 – деформирующий инструмент; 2 – фиктивный инструмент; 3 - заготовка

Рис. 1. Геометрическая модель накатывания резьб с импульсным нагружением инструмента

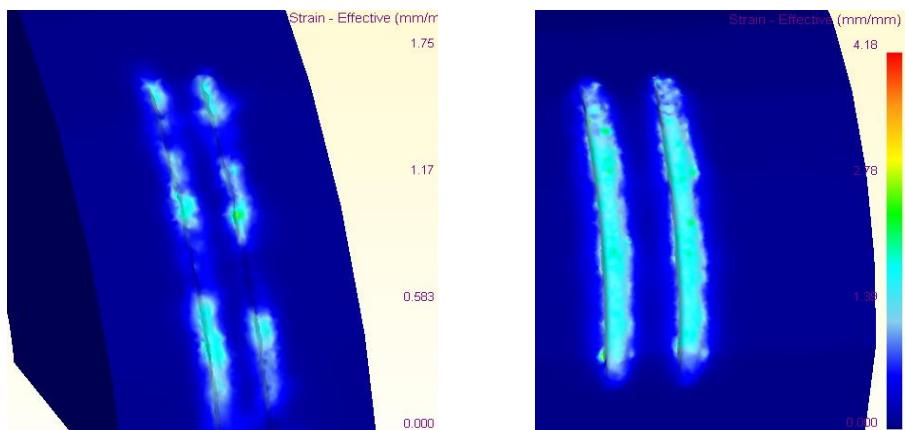


Рис. 2. Поля эквивалентных деформаций в заготовке при различном перекрытии отпечатков.

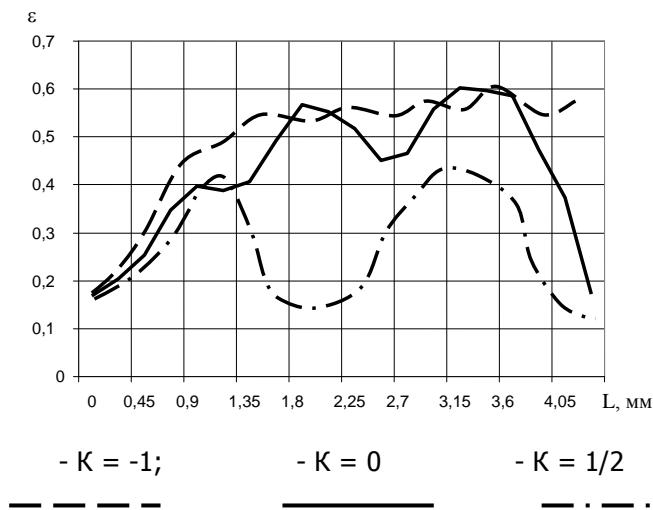


Рис. 3. Распределение эквивалентных деформаций под упрочненной волной деформации поверхностью.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДЯТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ ГРАНТА РФФИ  
12-01-97508-Р\_ЦЕНТР\_A.**

1. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека

технолога [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

2. Киричек, А.В. Исследование контактного взаимодействия при накатывании резьб и профилей с динамическим нагружением инструмента / А. В. Киричек, А.Н. Афонин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2009. № 2-2/274(560). – С. 72-77.

3. Киричек, А.В.Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов С.В., С. А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008, №97. – С. 5-8.

4. Киричек, А.В. Резьбонакатывание. Библиотека технолога [Текст] / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. - М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.

5. Бушенин, Д. В.Сравнение твердости резьбовых профилей, полученных пластическим деформированием различными методами [Текст] / Д. В. Бушенин, А. В. Киричек, А. Н. Афонин, И. Б. Кульков // Вестник машиностроения, 1999, №10. - С. 40-43.

### **III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ДРУГИХ СФЕРАХ ПРОИЗВОДСТВА.**

**УДК 621.9.048**

#### **АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА В ВИБРИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ ИЗ СМЕСИ ГРАНУЛ**

*Бранспиз Е.В, Бранспиз М.Ю, Кудряшова Д.С*

ВНУ имени Владимира Даля, г. Луганск, Украина

Излагаемый в данной работе материал относится к общей проблеме предварительного определения режима вибраабразивной обработки и параметров рабочей среды, позволяющего управлять процессом обработки, что позволяет решать актуальную задачу планирования производства на основе учета всех технологических особенностей абразивной обработки в свободной вибрирующей среде.

В настоящее время известны различные подходы к решению указанной проблемы на основе определения общей зависимости удельного (поверхностного) съема материала при

виброабразивной обработке от основных факторов, характеризующих процесс обработки (параметры режима обработки: амплитуда и частота вибраций, длительность обработки; параметры рабочей среды: форма и размеры абразивных гранул и характеристики абразивного наполнителя) [1-3]. Однако в условиях реального производства может иметь место ситуация, когда заданному съему при неизменяемых параметрах режима обработки (задаваемых исходя из технологических особенностей имеющегося оборудования) будет соответствовать такой размер гранул, который не присутствует в наборе гранул стандартных размеров. Именно этот случай как отдельная задача и рассматривается в данной работе применительно к U-образным камерам станков для виброабразивной обработки.

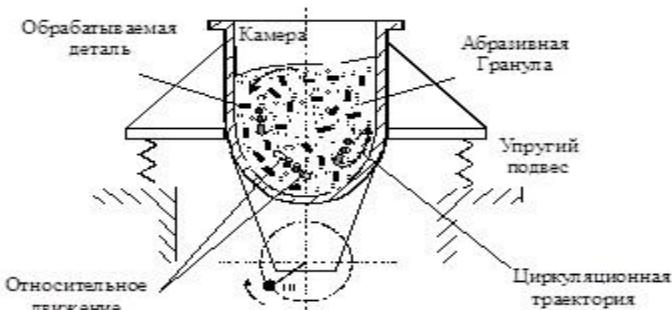


Схема станка для виброабразивной обработки с U-образной камерой

А именно, в данной работе рассматривается решение задачи определения в общей массе рабочей среды отношения массы гранул одного размера к массе гранул другого размера, обеспечивающее заданный съем при виброабразивной обработке деталей на вибрационных станках с U-образной камерой (рис.).

В такой постановке указанная задача, как это можно заключить из известных источников (их обзор приведен в [3]) решается впервые.

Для решения этой задачи учтем следующее. Пусть рабочая среда из гранул какого-то определенного размера обеспечивает при заданных параметрах режима обработки определенный съем

$Q_1$ , а рабочая среда из гранул большего размера (и массы) обеспечивает при тех же параметрах режима обработки съем  $Q_2$ . Тогда следует ожидать, что рабочая среда из смеси этих гранул будет обеспечивать съем материала  $Q_P$ , пропорциональный отношению массы гранул большего размера к массе гранул меньшего размера (обозначим это отношение  $\xi$ ). Отметим, что последнее соответствует линейной аппроксимации зависимости съема от параметра  $\xi$ .

С целью проверки указанного линейного характера зависимости  $Q(\xi)$  был осуществлен эксперимент по опытной обработке деталей цилиндрической формы (диаметр 14 мм, длина 30 мм, материал – ЛС 59-1 Л) на станке УВИ-25 при частоте и амплитуде 2 мм (время обработки 20 мин). Обработке подвергались одновременно 10 образцов. Обработка осуществлялась 5 раз. Съем определялся как разница веса образца до и после обработки (на аналитических весах ВЛА-200М). При этом в качестве гранул меньшей массы использовались призматические гранулы ПТ-10, а в качестве гранул большей массы использовались призматические гранулы ПТ-30. Соответствующие средние результаты экспериментов приведены в табл.

В этой же таблице приведены результаты расчета съема для смеси гранул по формуле

$$Q_P = Q_1 + (Q_2 - Q_1) \cdot \xi , \quad (1)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – съем материала с поверхности опытных образцов при обработке, соответственно, в среде только из гранул ПТ-10 и гранул ПТ-30;  $Q_P$  – съем материала с поверхности опытных образцов при обработке в смеси гранул, характеризуемой параметром  $\xi$ .

При этом, данные расчетов по (1) показывают, что на практике и в самом деле имеет место линейная зависимость съема материала от параметра  $\xi$  (в соответствующем столбце табл. через косую приведено значение погрешности расчета по рассматриваемой формуле, соответствующей прохождению прямой аппроксимации через крайние точки интервала

изменения параметра  $\xi$  от 0 до 1, в сравнении с экспериментальными данными).

Сравнение результатов опытов по обработке в смеси призматических гранул цилиндрических образцов с данными расчетов

$\xi$	Съем, мг		
	Эксперимент	Расчет по (1)	Расчет по (3)
0	20,4	20,4 / 0	23,0 / +12,7
0,25	23,7	26,4 / +11,4	26,0 / +9,7
0,5	34,1	32,5 / -4,7	29,0 / -15,0
0,75	36,5	38,5 / +5,5	31,0 / -15,1
1	44,5	44,5 / 0	35,0 / -24,2

Таким образом, если требуется обеспечить некоторый съем  $Q_p$ , а у технолога имеются гранулы дающие съем  $Q_1$  и  $Q_2$ , то, согласно (1), массовое содержание гранул, дающих съем  $Q_2$  в гранулах, дающих съем  $Q_1$ , может быть определено по формуле (здесь  $Q_1 < Q_2$ )

$$\xi = \frac{Q_p - Q_1}{Q_2 - Q_1} . \quad (2)$$

Далее, если учесть ту зависимость съема от параметров, характеризующих абразивную обработку деталей в выбирирующей рабочей среде из призматических абразивных гранул, которая получена в [3], и применить ее в рассматриваемом случае, то формулу (2) можно преобразовать к следующему виду (учитывая, что постоянные параметры обработки могут быть сокращены и в числителе и в знаменателе преобразовываемой формулы)

$$\xi = \frac{\sqrt[3]{\frac{m_p}{m_1} \cdot \left(\frac{S_p}{S_1}\right)^2 \cdot \frac{\ell_1 \cdot d_1}{\ell_p \cdot d_p} - 1}}{\sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \cdot \frac{\ell_1 \cdot d_1}{\ell_2 \cdot d_2} - 1}}, \quad (3)$$

где индексы Р, 1 и 2 относятся к гранулам, соответственно, расчетной (обеспечивающей расчетный съем), меньшей (обеспечивающей съем  $Q_1$ ) и большей (обеспечивающей съем  $Q_2$ );  $m$ ,  $S$ ,  $\ell$ ,  $d$  – соответственно, масса, площадь боковой поверхности, длина ребра и стороны основания трехгранной призматической гранулы.

В последнем столбце табл. приведен результат расчета по формуле (3) для расчетных гранул, соответствующих линейной аппроксимации зависимости  $Q(\xi)$ , которые показывают приемлемое для инженерных расчетов совпадение расчетных результатов с данными эксперимента (в соответствующем столбце табл. через косую приведено значение погрешности расчета по рассматриваемой формуле в сравнении с экспериментальными данными).

Таким образом, на основе изложенного можно сделать вывод: если технологическая необходимость обуславливает применение абразивных гранул отсутствующего типоразмера (расчетная гранула), то, используя выражение (2) или (3) можно определить массовое содержание гранул, больших по массе, чем расчетная гранула, в среде из гранул, меньших по массе, чем расчетная гранула; причем соответствующая зависимость съема от этого массового содержания является линейной.

В заключение отметим, что, учитывая общность структуры зависимости съема материала при вибраабразивной обработке от параметров процесса обработки [3], предложенные в данной работе зависимости могут быть применены и для гранул другой формы, кроме призматических. Это, впрочем, требует дополнительных исследований.

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии: В 2 ч. Ч 2. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1994.– 89 с.

2. Давыдова Т.В. Совершенствование вибрационной обработки деталей на основе создания новых схем вибрационного воздействия: Дис. к.т.н.– Ростов-на-Дону. 1996.– 182 с.

3. Бранспиз Е.В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров: Дис. ... к.т.н.– Луганск. 2002.– 268 с.

**УДК 621.924**

**ВИБРАЦИОННЫЕ И ВИБРОУДАРНЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ  
МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ  
МАШИН**

*Искович-Лотоцкий Р. Д., Манжилевський О. Д., Іванчук Я. В.*  
Винницкий национальный технический университет, г. Винница,  
Украина

Полезные вибрации, которые широко используются при проведении механических испытаний деталей и узлов машин, имитации реальных и граничных условий их эксплуатации. Необходимость в таких испытаниях обусловлена возрастающими требованиями к надежности приборов и механизмов. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований возникло научно обоснованное представление о механизме возникновения у испытуемых объектах повреждений и о методах их количественного оценивания [1-3].

Испытуемые объекты (ИО) содержат значительное количество конструктивных элементов различного назначения и сложности, которые неодинаково воспринимают воздействие механических вибраций (в том числе ударных, случайных и других периодических нагрузок) при изменении условий эксплуатации. Данные условия необходимо учитывать при разработке методик испытаний соответствующего специального оборудования.

Исследование неисправных ИО (приборов, узлов, соединений) дает возможность выявить две основные причины потери их надежности: усталостное разрушение конструктивных элементов и ослабление зажимов и резьбовых соединений. По результатам оценки условий эксплуатации и изучение особенностей различных повреждений определяются методы и условия испытаний, которые могут быть реализованы на испытательных установках [1].

Всю совокупность конструктивных элементов того или иного ИО, с целью изучения их реакции на вибрационные и виброударные воздействия, можно представить в виде простой линейной системы масс, пружин и демпферов, пример которой показан на рис. 1. Такая многомассовая система характеризуется приведенными коэффициентами жесткости ( $C_n$ ) и демпфирования ( $\beta_n$ ), которые определяются соответствующими параметрами взаимодействия  $i$ -х конструктивных элементов при известной массе  $m_i$  каждого из них. Эта система которые расположены на общей рабочей основе (вибrostоле), которая осуществляет колебания по заданному закону. В случае совпадения собственных частот колебаний элементов системы  $f_{0i}$ , с частотой внешнего периодического влияния  $f_b$  обеспечивается интенсификация испытательного технологического процесса.

Имитация воздействия механических нагрузок при вибрационных или виброударных испытаниях возможна при использовании различных способов: синусоидального воздействия с фиксированной частотой (данный способ непригоден при необходимости проведения испытаний объектов, элементы которых имеют различные частоты резонанса, поскольку при его применении обеспечивается резонанс только одного или нескольких элементов); синусоидального воздействия с частотой, которая медленно изменяется в диапазоне между двумя предельными значениями, при этом все конструктивные элементы и детали, подверженных вибрациям, постепенно приводятся в состояние резонанса; широкополосного стохастического воздействия (случайных вибраций), что скорее воспроизводит реальные условия эксплуатации (недостатком данного способа есть трудности с его реализацией); узкополосного стохастического воздействия с амплитудой, изменяющейся по случайному закону, при этом в многомассовой системе ИО в состояние резонанса может быть приведена только определена деталь или один конструктивный элемент; узкополосного стохастического воздействия, средняя частота которого медленно колеблется между двумя фиксированными частотами, позволяет воспроизвести почти все виды воздействий, которые встречаются на практике; ударного или импульсного, периодического воздействия на ИО.

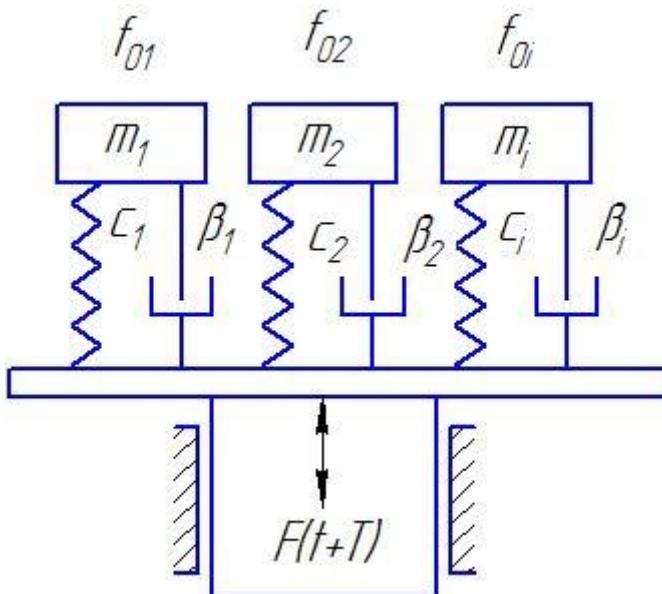


Рисунок 1 – Расчетная схема многомассового ИО

В каждом из указанных способов внешнее периодическое влияние на линейную систему ИО вызывает изменение ускорений элементов его конструкции по синусоидальному закону. Исследования [1] показали, что ускорение  $i$ -й массы  $\mathbf{a}_{m,i}$  пропорционально механическому напряжению в соответствующем упругом элементе. Это позволяет рассматривать величину  $\mathbf{a}_{m,i}$  как основной параметр нагрузки, а ускорение  $\mathbf{a}_0$ , что вызывает данную нагрузку – как параметр внешнего силового воздействия. Отношение ускорений  $\mathbf{a}_{m,i} / \mathbf{a}_0 = \mathbf{A}$  определяет передаточный коэффициент системы ИО.

На рис. 2 приведены графики, характеризующие изменение параметров воздействий на ИО, а также его реакцию. Сам ИО представлен в виде линейной упругой системы, подвергается воздействию внешней синусоидальной нагрузки с фиксированной частотой. Наибольшие напряжения в ИО возникают при совпадении его собственной частоты  $f_{0i}$  с фиксированной частотой синусоидального нагружения  $f_0$ . Соответствующее внешнее ударное или импульсное воздействие

на ИО  $a_0(t)$  характеризуется длительностью  $\tau$ , что мало отличается от нуля. Реакция на такой ударное или импульсное внешнее воздействие  $a_0(t)$  определяется зависимостью  $a_m(t)$ , которая показана на рис. 3 и может быть разбита на интервалы: ( $t < \tau$  – текущая реакция на удар и  $t > \tau$  – ударное последействие. При очень низких частотах ( $f_0 \ll 1/\tau$ ) (рис. 3, б) реакция системы на удар имеет вид синусоидальных колебаний. Для частот  $f_0$  сравнимых с  $2/\tau$  (рис. 3, д), текущая реакция системы имеет первое пиковое значение  $a'_m$ . и последействие с первым пиковым значением  $a''_m$ . Для очень высоких частот  $f_0 >> 1/\tau$  (рис. 3, е) ускорение массы  $a_{m,i}(t)$  квазистатически повторяет влияние  $a_0(t)$  [1].

Для определения количественных параметров усталостных повреждений, которые возникают в ИО, необходимо установить их зависимость от числа воздействий, имеющих заданные амплитудные значения пиковых нагрузок, характеризующиеся ускорениями  $a_{m,i}$  а также от критерия усталостных разрушений в элементах конструкции ИО. Полученные теоретические зависимости [1] подтверждены экспериментально. По ним можно рассчитать срок службы элементов системы ИО, что подвергается различным внешним периодическим силовым воздействиям.

### **Виды испытаний**

Механические испытания по функциональному назначению разделяются на испытания на прочность, во время которых при определенных условиях эксплуатации оценивается сопротивление конструктивных элементов ИО разрушению, а также для испытания работоспособности, при которых определяется способность ИО нормально функционировать в заданных условиях эксплуатации. Обычно продолжительность испытаний работоспособности ИО меньше, чем продолжительность испытаний прочности. В связи с тем, что непосредственной причиной возникновения повреждений и выхода из строя ИО является ускорение, влияющее на его конструктивные элементы, на практике для испытаний работоспособности и прочности обычно используют одинаковые методы и испытательные установки.

Испытание на прочность проводятся выборочно и предназначены для определения в ИО слабых мест, которые возникают в следствии повреждения элементов конструкции или

усталости материала. Для уменьшения времени проведения испытаний и достижения их наибольшего соответствия эксплуатационным условиям применяют так называемый коэффициент жесткости [1, 2]. Минимальная продолжительность испытаний или наименьшее число ударов обычно определяются путем теоретического анализа расчетной модели или проведением соответствующих экспериментов. Считают, что ИО выдержал испытания, если после его окончания визуально не обнаруживаются механические повреждения или изменения. Испытание работоспособности может быть как выборочным, так и сплошным. Результаты испытаний считаются успешными, если ИО при внешнем силовом воздействии работает безупречно, в соответствии с техническими паспортными данными. Технологические испытания проводятся в процессе изготовления изделий. Целью их является выявление технологических причин преждевременного выхода из строя изделия или возникновения механических дефектов в резьбовых соединениях и в местах холодных паяк. При технологических испытаниях успешно применяются воздействия с малым числом ударов и с небольшими ускорениями.

### **Способы испытаний**

Методика проведения испытаний разрабатывается на основе исходных требований к работоспособности испытуемой системы (соответствии основных рабочих параметров паспортным данным) или прочности ее элементов с анализом возможности реализации способов испытаний на имеющемся испытательном оборудовании и оценкой его эффективности. Испытание на работоспособность и прочность заключаются в определении ряда параметров ИО при воздействии внешних механических нагрузок, обеспечивающих реальные условия эксплуатации системы. Подобным исследованиям подвергаются радио- и электротехнические приборы, машины и установки, узлы и детали машин, выходящих из строя вследствие динамичного и усталостного разрушения, а также ослабление зажимов и резьбовых соединений.

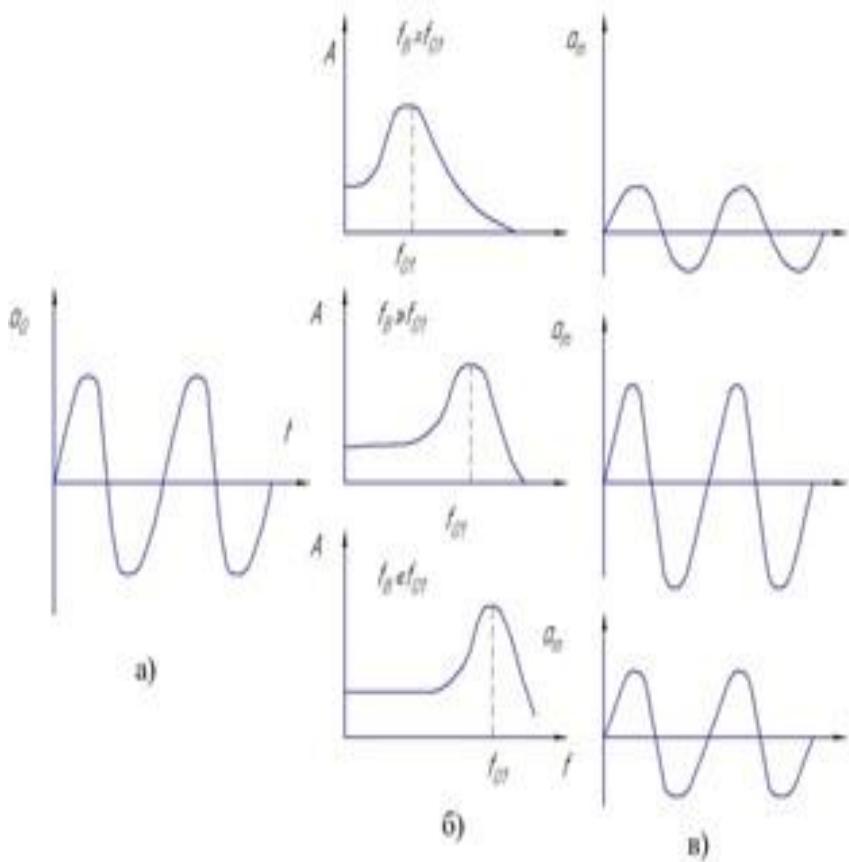


Рисунок 2 – Характер влияния на ИО внешней синусоидальной нагрузки с фиксированной частотой: а) – внешнее влияние; б) – зависимость передаточного коэффициента от частоты внешнего влияния; в) – реакция системы

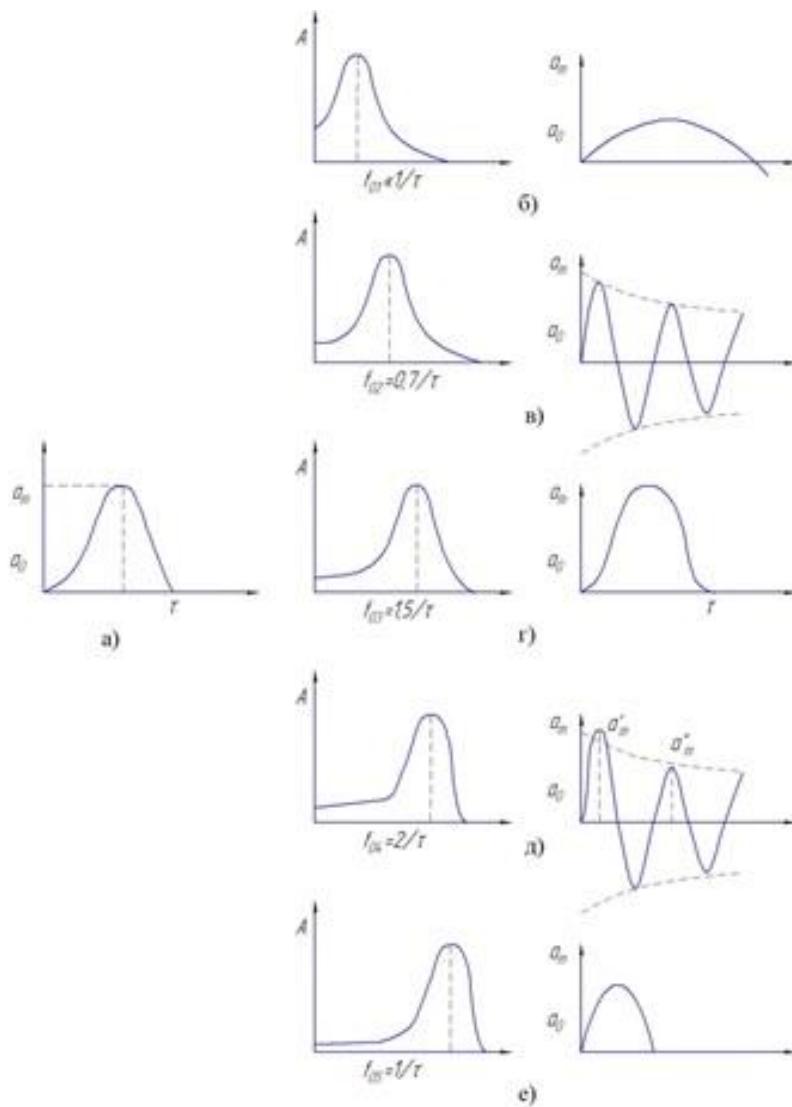


Рисунок 3 – Реакция системы ИО на ударное внешнее влияние: а) – внешнее влияние; б - е) – зависимость передаточного коэффициента от частоты внешнего влияния (слева) и реакция системы (справа)  $a_0(t) = a_0 \cdot \sin nt/\tau; 0 < t <$

Выбор способа испытаний определяется объемом и содержанием данных о ИО и условия его эксплуатации, а также наличием испытательного оборудования. Наиболее распространенными являются два способа проведения механических испытаний: на специальном испытательном оборудовании, например, при создании принудительных механических колебаний (вибраций) ИО по синусоидальному закону с фиксированной частотой; на обычных грузовых транспортных средствах при создании механических колебаний ИО по закону, который определяется рельефом дороги и скоростью транспортного средства. Однако указанные способы проведения механических испытаний не всегда обеспечивают исчерпывающую информацию о параметрах ИО, а кроме того, они являются неэкономичными и длительными в реализации. Внешние воздействия могут быть классифицированы следующим образом.

Синусоидальная вибрация: с фиксированной частотой; с частотой, которая ступенчато изменяется; с частотой, которая плавно изменяется; постоянной продолжительности; с постоянным числом циклов.

Ударная нагрузка: отдельными ударами; серией ударов; из заданным изменением ударного импульса; виброударная.

Стохастическая вибрация: с фиксированными частотами; с широкополосным или узкополосным шумом; с частотой, которая плавно меняется, с узкополосным шумом, который плавно изменяется; с многократным узкополосным шумом.

Эффективность применения внешних воздействий определенного типа оценивается с помощью исходной упрощенной линейной модели (см. рис. 1), на которой указываются конструктивные элементы с различными резонансными частотами от 10 до 100 Гц [1]. Рассмотрим, характерные типы внешних воздействий. При внешнем воздействии на ИО синусоидальной вибрации с фиксированной частотой в течение промежутка времени испытаний  $t_i$  усилия нагрузки определяется виброускорением с амплитудным значением  $\bar{a}_0$  и частотой внешнего воздействия  $f_v$ . Совпадение собственной частоты  $f_{oi}$  определенного конструктивного

элемента  $m_i$  с частотой внешнего воздействия  $f_b$  соответствует резонансной нагрузке с ускорением  $a_p$ , что значительно превышает  $\bar{a}_0$ . Такой способ внешнего влияния на ИО целесообразно при известных частотах  $f_b$ , которые возникают в условиях реальной эксплуатации или транспортировки.

Испытание внешним воздействием с частотой, которая ступенчато меняется, рекомендуются для ИО определенным резонансными частотами конструктивных элементов. При этом важно правильно установить последовательность ступенчатого изменения частот внешнего воздействия. Преимущество данного способа испытаний заключается в том, что они проводятся только на тех частотах, при которых конструктивные элементы ИО подвергаются наибольшей нагрузке. Недостатком способа является трудности с определением резонансных частот для систем ИО. Целесообразным является плавное изменение частоты нагрузки в определенном диапазоне, в результате которой каждый конструктивный элемент ИО, который имеет расчетную жесткость, рано или поздно окажется в режиме резонанса.

Испытания отдельными ударами необходимо проводить через значительные интервалы времени, чтобы к моменту начала воздействия каждого следующего удара амплитуды колебаний всех конструктивных элементов ИО уменьшались бы до определенной величины. Последнее достигается выбором и обеспечением соответствующего закона изменения ударного импульса. Основой для определения условий испытаний могут служить зависимости ударного ускорения от времени, а также вид ударного спектра.

В последнее время в промышленности нашел применение способ испытания влиянием на ИО ударами сложной (комплексной) формы. Данный способ является прогрессивным, но не получил широкого распространения из-за больших расходов на изготовление испытательных установок способных достаточно точно воспроизводить необходимую форму сложных ударных импульсов. Способы испытаний при создании случайных стохастических воздействий точно отражают реальные условия эксплуатации. Однако большого распространения эти способы также не получили из-за большой трудоемкости и значительных расходов на изготовление специального испытательного оборудования для их реализации.

## **Условия испытаний**

Для определения рабочих параметров испытаний при выбранном способе их проведения необходимо иметь данные о жесткости и продолжительность исследований, а также о специфических параметры и характеристики внешнего воздействия.

Жесткость испытаний находится в прямой зависимости от заданного значения ускорения. Например, для случая ударного влияния определяющим параметром является максимальное ударное ускорение. Продолжительность испытаний зависит от способа реализации внешнего воздействия, вида механической модели ИО и реальных условий эксплуатации.

Специфические параметры внешнего воздействия определяются, в основном, механической моделью ИО, условиями эксплуатации и техническими возможностями средств испытаний. Испытаниям вибрационными воздействиями подвергаются приборы, устройства и соединения, которые по условиям эксплуатации должны сохранять работоспособность и иметь соответствующие характеристики прочности при воздействии на них импульсных нагрузок. Испытания при помощи серии ударных воздействий рекомендуется проводить для воспроизведения нагрузок, возникающих при часто повторяемых в процессах эксплуатации и транспортировки ИО толчках и встряхиваниях. Для проведения испытаний ударными воздействиями рекомендуется применять полусинусоидальные удары [1,3].

В работе [1] приведены рекомендуемые режимы испытаний приложением ударных воздействий. Ударные воздействия воспроизводят режим эпизодической импульсной нагрузки ИО при эксплуатации или транспортировке.

Кроме полусинусоидальных импульсов, в качестве внешнего влияния при испытаниях можно использовать треугольные и трапецидальной ударные импульсы. В работе [3] приведены рекомендуемые значения относительных ( $a_0 / g$ ) пиковых ускорений и продолжительности действия удара ( $\tau$ ) на ИО в зависимости от необходимого режима испытаний.

## Испытательные стенды

Вышеупомянутые способы и условия испытаний можно реализовать на малогабаритных вибрационных стендах с гидроимпульсным приводом (ГИП) (рис. 4 - 5).

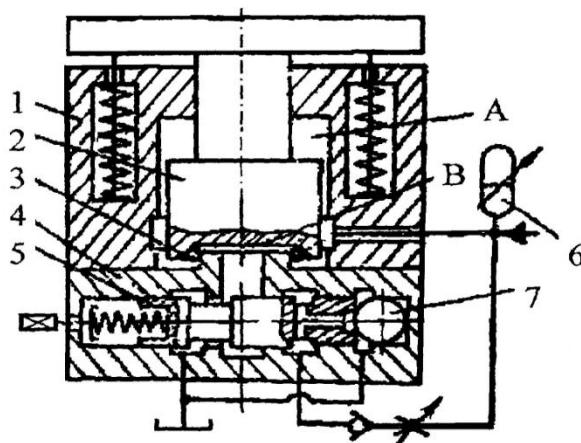


Рисунок 4 – Малогабаритный вибростенд на основе ГИП

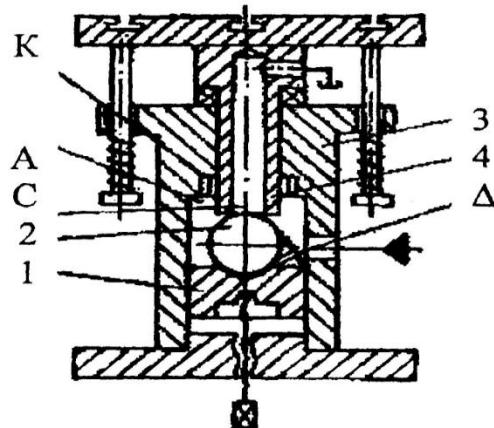


Рисунок 5 – Малогабаритный вибростенд на основе ГИП С шариковым запорным элементом

Вибростенд, который изображен на рис. 4, в предназначен для создания на дифференциальном плунжере 2 вибростола кратковременных периодических нагрузок, что обеспечивает в моменты разрядки одноциклового гидроаккумулятора 6 в полость исполнительного гидроцилиндра (основы) значительные мгновенные мощности. Благодаря возможности реализации таких вибрационных и виброударных нагрузок импульсный вибростенд можно рекомендовать для применения в составе испытательных машин. Управление ГИП вибростенда осуществляется встроенным золотником 5, который взаимодействует с шариком 7. При достижении в гидросистеме расчетного давления настраиваемый золотник 5 перемещается влево и открывает доступ рабочей жидкости с напорной гидролинии в полость В, отделяя ее одновременно от слива. При этом нарушается условие устойчивой посадки дифференциального плунжера 2 на кольцо, которое герметизирует полости А и В. На плунжер 2 начинает действовать направленная вверх сила, соответствующая импульсному увеличению рабочей нагрузки на ИО. При обратных ходах вибростола под действием сил тяжести и упругости элементов упругого возврата в моменты столкновения вибростола и основы генерируются ударные нагрузки.

Вибростенд, который изображен на рис. 5 имеет сравнительно простой узел управления приводом вибраций и незначительные габаритные размеры за счет выполнения исполнительного элемента в виде подвижного плунжера с осевой расточкой, к которому под влиянием перепада давлений между полостями А и С прижат шариковый запорный элемент 2. Расчетный зазор  $\Delta$ , определяющий необходимый перепад давлений, устанавливается с помощью подвижного поршня 1, который под влиянием регулировочного винта перемещается в расточке цилиндра 3. При повышении давления в полости А плунжер 4 перемещается вверх, шариковый запорный элемент 2 отрывается от седла на плунжере 4, что вызывает падение давления в полости А и возвращение рабочего стола вибростенда в исходное положение. Когда между шариковым запорным элементом 2, что садится на поршень 1, и кромками седла на плунжере 4 установится зазор соответствующий исходному зазору  $\Delta$ , между полостями А и С восстанавливается

необходимый перепад давлений, при котором шариковый запорный элемент 2 будет прижат к седлу.

На предлагаемом оборудовании можно достаточно точно имитировать реальные условия эксплуатации. Для правильного решения поставленной задачи осуществляется анализ нагрузок, которым подвергаются ИО в реальных условиях работы. Например, при погрузке и разгрузке изделий преобладают одиночные удары, непосредственно на рабочем месте создаются стационарные условия эксплуатации, при транспортировке на автомобилях возникают стохастические (случайные) воздействия. После анализа условий эксплуатации решается ряд важных задач: проводится оценка влияния сил на ИО, которые вызывают повреждения, в зависимости от различных условий эксплуатации; выбираются условия испытаний, соответствующие заданным условиям эксплуатации; осуществляется определение допустимых условий эксплуатации.

- 
1. Ленк А. Механические испытания приборов и аппаратов / А. Ленк, Ю. Ренетц – М.; Мир, 1976. – 264с.
  2. Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев, В. А. Крат. – К.: Техніка, 1982. – 208 с. : ил.
  3. Іскович-Лотоцький Р. Д. Процесси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Севостьянов І. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 291 с.

**УДК 621.762.04**

**К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОМОЛА В БИЛЬНОЙ  
МЕЛЬНИЦЕ**

*Егоров И.Н.*

ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Механическое измельчение может быть самостоятельным способом получения порошков или дополнительной операцией. Для тонкого измельчения применяются барабанные, вибрационные, струйные, шаровые, ударные, планетарные центробежные мельницы и аттриторы [1, 2]. Технология измельчения непрерывно совершенствуется. Предпринимаются

меры интенсификации процесса измельчения. Один из методов интенсификации процесса помола ферромагнитных материалов в бильной мельнице – перевод дисперской среды в области вращающихся бил в псевдоожженное состояние. Образование псевдоожженного слоя в рабочей камере мельницы осуществляется под действием переменного неоднородного и постоянного магнитных полей, силовые линии которых взаимно перпендикулярны и параллельны плоскости вращающихся с частотой  $15,0 \pm 1,6$  тыс. об/мин бил [3].

В работе [4] показано, что измельчение дисперсного материала феррита стронция в бильной мельнице в псевдоожженном слое обеспечивает не только уменьшение среднего размера частиц, но и получение порошка более однородного по фракционному составу.

Целью настоящей работы является анализ причин интенсификации процесса помола в бильной мельнице в псевдоожженном слое.

Для проведения исследований измельчению подвергали дисперсный материал на основе сплава Nd-Fe-B следующего состава, % ат.: Nd – 12,3; Fe – 77,4; В – 6,2; Со – 5,1. Измельчение проводили в мельнице в трех режимах:

1. без электромагнитного воздействия;
2. без электромагнитного воздействия, но через каждые 30 с питание электродвигателя отключалось, и проводили механическое перемешивание дисперской среды;
3. в переменном магнитном поле с индукцией 4,5 мТл, градиентом индукции 126,6 мТл/м и постоянном магнитном поле с индукцией 15,3 мТл.

В режимах 1 и 2 средний размер частиц исходного дисперсного материала 45,0 мкм, дисперсия 40,5 мкм и медиана 28,8 мкм. В режиме 3 измельчению подвергался дисперсный материал со средним размером частиц 71,5 мкм, дисперсией 71,5 мкм и медианой 44,0 мкм. Исходный материал измельчали в течение 5 минут, при этом через 1 минуту помола отбирали пробы для исследования. Количественной характеристикой интенсивности процесса является степень измельчения, показывающая, во сколько раз уменьшается средний размер измельчаемого материала [5]. Из рис. 1 следует, что степень измельчения для всех исследованных режимов возрастает с

уменьшением среднего размера частиц. В первые четыре минуты степень измельчения значительно при помоле в режиме 2. Однако при дальнейшем помоле максимальная степень измельчения соответствует режиму 3.

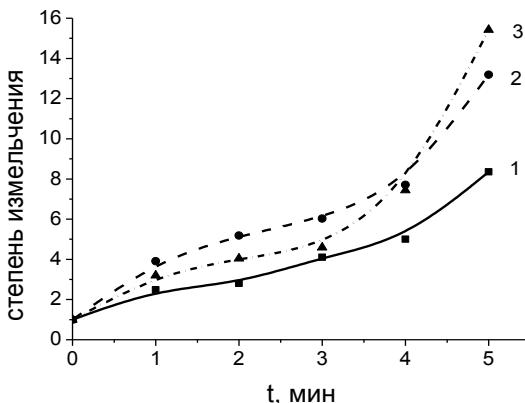


Рис. 1. Зависимость степени измельчения дисперсного материала Nd-Fe-B от времени помола в режимах 1, 2 и 3

Очевидно, что интенсификация процесса помола в режиме 2 по сравнению с режимом 1 обусловлена только перемешиванием дисперсной среды. После трехминутного помола степень измельчения в режиме 2 увеличилась на 1,9, средний размер частиц составил 7,5 мкм. Через 5 минут помола степень измельчения возросла на 4,8, средний размер частиц достигнул 3,4 мкм. Полученные результаты свидетельствуют, что процедура перемешивания интенсифицирует процесс помола в большей степени, когда дисперсная среда имеет меньшие размеры частиц.

В режиме 3 перемешивание дисперсной среды осуществляется под действием сил со стороны переменного неоднородного магнитного поля. Поступательное движение частиц в градиентном поле приводит к столкновению частиц и агрегатов со стенками камеры и друг с другом, что может способствовать их разрушению. До четырех минут помола более эффективен процесс в режиме 2. Через четыре минуты помола в режиме 3 средний размер частиц достиг 9,6 мкм. После пяти

минут помола степень измельчения в режиме 3 по сравнению с режимом 2 увеличилась на 2,3, а средний размер уменьшился до 4,6 мкм.

На основании приведенных результатов можно заключить, что при измельчении в бильной мельнице в режиме псевдоожижения наибольшая интенсификация процесса достигается за счет перемешивания дисперской среды. Процесс самоизмельчения активизируется при достижении среднего размера дисперской среды 10 мкм.

---

1. Goldman A. Modern Ferrite Technology, 2nd Ed.- Pittsburgh: Springer.- 2006.- 438 p.

Летюк Л.М. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники / Л.М. Летюк.– М.: МИСИС, 2005. – 352 с.

2. Патент РФ № 2306180. Способ измельчения магнитных материалов и устройство для его осуществления / Егоров И.Н., Вернигров Ю.М., Егорова С.И. Кл. 6 В02C 13/00, Опубл. 2007.09.20. Бюл. № 26.

3. Егоров И.Н. Влияние электромагнитного воздействия на дисперсный состав при помоле ферромагнитных материалов в бильной мельнице / И.Н. Егоров, С.И. Егорова //Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. - № 1. – С. 18 – 21.

4. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. - М.: Недра, 1980. – 415 с.

## УДК 621.787

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЫБОРА МЕТОДА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

*Полов М.Е.*

ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Анализ видов, методов, способов и технологии упрочняющей обработки ответственных деталей показал, что они отличаются большим разнообразием, в максимальной степени учитывают конструктивные особенности и служебное назначение деталей. Однако, выбор методов, способов и технологии упрочняющей обработки деталей недостаточно formalизован, что при частой смене моделей объектов производства приводит к необходимости длительной отработки технологии упрочняющей обработки новых деталей уже на

стадии их производства [1,2,3].

В современном производстве при использовании интегрированных САПР эта задача должна эффективно решаться ещё на стадии проектирования и технологической подготовки производства новых изделий.

Пусть имеется некоторый набор методов упрочняющей обработки  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n$  ( $\mu_i$ -  $i$ -й тип метода обработки).

Для каждого из методов упрочняющей обработки, принадлежащих к указанной группе  $[\mu_i]^n = 1$ , известен набор технологических параметров, достигаемых этим методом:

для  $\mu_1$ :  $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, \dots, X_j^{(1)}, \dots, X_m^{(1)}$ ;

$\mu_2$ :

$X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}, \dots, X_j^{(2)}, \dots, X_m^{(2)}$ ;

.....  
 $\mu_i$ :

$X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, X_3^{(i)}, \dots, X_j^{(i)}, \dots, X_m^{(i)}$ ;

.....  
 $\mu_n$ :

$X_1^{(n)}, X_2^{(n)}, X_3^{(n)}, \dots, X_j^{(n)}, \dots, X_m^{(n)}$ .

В пространстве параметров  $[X_j]^m = 1$ , каждому методу упрочняющей обработки  $[\mu_i]^n = 1$  будет соответствовать точка  $\mu_i$  с координатами  $X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, X_3^{(i)}, \dots, X_j^{(i)}, \dots, X_m^{(i)}$ .

Обозначим заданные конструктором числовые характеристики параметров упрочненного слоя детали через  $X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_j^{(0)}, \dots, X_m^{(0)}$ .

Тогда идеальным (эталонным) методом упрочняющей обработки для рассматриваемой детали был бы метод  $\mu_0$ , характеристики которого были бы равны требуемым параметрам упрочняемой детали.

В пространстве параметров  $[X_j]^m = 1$ , этому методу упрочнения будет соответствовать точка  $\mu_0$  с координатами  $X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_j^{(0)}, \dots, X_m^{(0)}$  (рис. 1).

При выборе метода упрочняющей обработки трудно найти метод, обеспечивающий полное совпадение всех его физико-механических и других параметров с заданными эталонными значениями, требуемыми для конкретной детали. Поэтому рассматриваемая задача сводится к определению метода упрочняющей обработки наиболее близко стоящего по своим параметрам к эталонному методу  $\mu_0$ , т. е. к удовлетворению условия близости: минимум функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  - евклидово расстояние.

Процесс минимизации может осуществляться по нескольким типам минимизирующих функционалов, например:

где  $i$  и  $j$  - параметры упрочненного слоя для рассматриваемого метода упрочняющей обработки и эталонные, требуемые по условиям эксплуатации детали;

- весовые функции, определяющие степень важности параметра.

В общем случае параметры  $i$  представляют случайные величины и характеризуются математическим ожиданием  $\bar{i}$  и дисперсией  $\sigma_i^2$ . Тогда, заштрихованная область на рис. 1, характеризует вероятность достижения требуемых свойств обрабатываемой детали при применении  $i$ -го метода упрочняющей обработки.

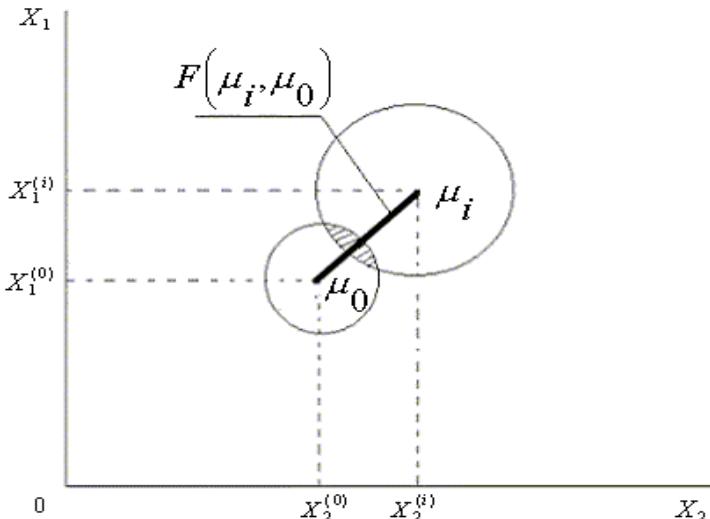


Рис. 1. Схема выбора метода упрочняющей обработки в пространстве параметров состояния поверхностиного слоя детали.

На практике, обычно, на параметры свойств детали устанавливается номинал в середине поля допуска. Но это интуитивное решение является априорно оптимальным лишь в том весьма частном случае, когда одновременно имеет место:

- симметричный (по отношению к номиналу) закон распределения отклонений параметра;
- одинаковая (симметричная по отношению к центру допуска) цена годной продукции и одинаковая стоимость продукции, выходящей за пределы допуска.

Практически, в очень большом числе реальных случаев, имеет место несимметричное распределение цены результата. Во всех этих случаях подлежит исследованию вопрос о целесообразном смещении номинала относительно середины допуска, т. е. смещении, создающем наибольшее математическое ожидание цены результата.

Метод оптимума номинала [4] позволяет для любого известного закона распределения отклонений и заданного распределения цен результата определить такое смещение номинала от середины поля допуска, которое дает наибольшее

значение математического ожидания цены результата – наибольшую интегральную потребительскую эффективность  $U^i(X)$ .

Математическое ожидание  $E$  (Expectation) интегрального показателя потребительской ценности  $U^i(X)$  по каждой  $j$ -ой альтернативе ( $i=1,2, \dots, n$ ) по совокупности показателей  $X = [x_j]^m_j = 1$  может быть определено по формуле [5]

$$E[U^i(X)] = \frac{1}{K} \left\{ \left[ \prod_{j=1}^m (K \cdot w_j E[U_j(x_j)] + 1) \right] - 1 \right\},$$

где  $E[U_j(x_j)] = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} U_j(x_j) \cdot f(x_j) dx_j$ ;

$f(x_j)$  – функция (закон) распределения плотности вероятности  $j$ -го ( $j=1,2, \dots, m$ ) единичного критериального показателя (параметра)  $x_j$ ;

$U_j(x_j)$  – функция потребительской ценности для  $j$ -го ( $j=1,2, \dots, m$ ) единичного критериального показателя  $x_j$ ;

$x_j$  – требуемый уровень  $j$ -го критериального показателя ( $j=1,2, \dots, m$ );

$w_j$  – весовой коэффициент каждого  $j$ -го ( $j=1,2, \dots, m$ ) критериального показателя,  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ .

$K$  – постоянная нормализации.

На рис. 2 показана принципиальная схема алгоритма принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки проектируемой детали на основе минимизирующего функционала и интегрального показателя потребительской ценности.

В блоке 2 производится ввод вектора параметров  $X_j^{(0)}$ ,  $j = 1, m$ , которые требуется обеспечить по условиям эксплуатации детали, а также вводится вектор заданных

значений весовых функций  $\rho_j, j = 1, m$ , определяющих степень важности каждого параметра.

В блоках 3 и 4 производится нормализация данных и формируется цикл расчёта массива значений минимизирующего функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$ , а в блоке 5 выполняется подпрограмма поиска его минимального значения, т.е.  $\min F(\mu_i, \mu_0)$ .

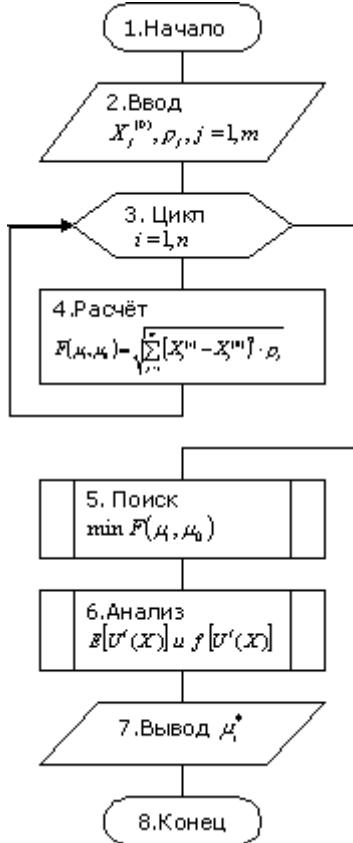


Рис. 2. Схема алгоритма принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки детали.

В блоке 6 выполняется подпрограмма анализа полученного минимального значения  $F(\mu_i, \mu_0)$  и определяется

соответствующий ему рекомендуемый системой метод упрочняющей обработки  $\mu_i^*$ . В соответствии с табл. 2 и рис. 1 анализируются возможные конкурирующие методы упрочняющей обработки, имеющих близкие к  $\mu_i^*$  значения  $\min F(\mu_i, \mu_0)$  и имеющие более высокие значения интегрального показателя потребительской ценности  $E[U^i(X)]$  и вероятности достижения цели  $f[U^i(X)]$ . В блоке 7 выводится окончательное решение по выбору метода упрочняющей обработки  $\mu_i^*$ .

Для иллюстрации, рассмотрим примеры работы алгоритма поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки для проектируемой детали машины. В таблице 1 представлены технико-экономические показатели методов восстановления и упрочнения, подлежащих выбору [6]. Классификационными признаками приняты показатели твёрдости и толщины упрочнённого слоя, производительности и себестоимости метода упрочняющей обработки.

Как видно из таблицы значения единичных показателей варьируют в широких пределах. Соответственно имеет место и рассеивание значений интегрального показателя потребительской ценности  $U(X)$  (табл. 2). Табл. 1 и 2 будем использовать в качестве баз данных.

Таблица 1  
Технико-экономические показатели методов упрочнения

№ п/ п	Методы, варианты методов и их разновидност и	Твердость нанесенно го покрытия, <i>HRC</i>	Толщина слоя материала за один проход, <i>мм</i>	Производи тельность, <i>кг/ч</i>	Удельная себестоимост ь (1 <sup>г</sup> ) покрытия, <i>коп</i>
<i>i</i>	$\mu_i$	$X_{1i}$	$X_{2i}$	$X_{3i}$	$X_{4i}$
<b>Металлизация:</b>					
1.	плазменно- дуговая	18-61	0,05-10,0	0,8-12,0	1,398-1,95

2.	электродуговая	20-42	0,10-3,0	2,5-38,0	0,146-0,758
3.	высокочастотная	19-20	0,05-12,0	4,0-12,0	0,237-0,370
4.	газовая	43-48	0,05-12,0	0,8-20,0	0,129-0,784
<b>Наплавка:</b>					
5.	электродуговая	14-63	0,1-20,0	1,8-60,0	0,308-0,337
6.	автоматическая под слоем флюса	17-62	0,5-20,0	1,8-60,0	0,308-0,337
7.	порошковыми проволоками	21-60	2,5-3,0	2,0-20,0	0,254-0,434
8.	в среде защитных газов	20-62	0,8-4,0	1,56-4,4	0,242-0,474
9.	электроимпульсная	30-70	0,4-0,75	0,5-1,5	0,907-0,949
10.	вибродуговая	14-63	0,5-5,0	0,6-4,4	0,279-0,746
11.	плазменная	32-70	0,1-12,0	2,0-18,0	0,062-0,373
12.	индукционная	46-63	0,3-5,0	20,0	0,748-0,751
13.	электрошлаковая	51-62	10,0-20,0	10-60	0,028-0,039
14.	в среде водяного пара	12-26	1,0-3,0	2,0-2,8	0,182-0,387
15.	ручная (электродами)	25-63	0,1-3,0	0,4-4,0	0,192-1,64
16.	газовая	13-42	0,5-1,5	1,19-1,69	0,238-0,338
<b>Гальванопокрытие:</b>					
17.	хромирование	35-72	0,05-1,0	0,007-0,025	16,644-57,502
18.	железнение	21-62	0,1-5,0	0,011-0,085	6,58-37,13
19.	никелирование	24-72	0,05-1,5	0,018-0,036	11,8-53,98

Таблица 2  
показателя

Рассеивание значений интегрального потребительской ценности

№ п/п	Метод упрочнения (восстановления), $\mu_i$	$E[U(X)]$	$f_{\max}[U(x)]$	$\Delta U(X)$	$U(X)_{\min}$	$U(X)_{\max}$	$\sigma_{U(X)}$
<b>Металлизация:</b>							
1.	плазменно-дуговая	0,496	0,22	0,322	0,335	0,657	0,054
2.	электродуговая	0,472	0,30	0,242	0,351	0,594	0,040
3.	высокочастотная	0,429	0,49	0,146	0,356	0,503	0,024
4.	газовая	0,547	0,35	0,206	0,444	0,649	0,034
<b>Наплавка:</b>							
5.	электродуговая	0,326	0,15	0,487	0,082	0,569	0,081
6.	автоматическая под слоем флюса	0,632	0,12	0,582	0,341	0,923	0,097
7.	порошковыми проволоками	0,494	0,62	0,232	0,378	0,611	0,039
8.	в среде защитных газов	0,466	0,32	0,222	0,355	0,577	0,037
9.	электроимпульсная	0,479	0,41	0,175	0,392	0,567	0,029
10.	вибродуговая	0,457	0,27	0,268	0,323	0,592	0,045
11.	плазменная	0,569	0,21	0,336	0,402	0,737	0,056
12.	индукционная	0,583	0,60	0,120	0,523	0,643	0,020
13.	электрошлаковая	0,766	0,23	0,314	0,609	0,923	0,052
14.	в среде водяного пара	0,366	0,87	0,083	0,325	0,408	0,014
15.	ручная (электродами)	0,467	0,35	0,206	0,364	0,570	0,034
16.	газовая	0,389	0,54	0,134	0,322	0,457	0,022
<b>Гальванопокрытие:</b>							
17.	хромирование	0,442	0,32	0,223	0,331	0,554	0,037

18.	железнение	0,432	0,27	0,266	0,299	0,564	0,044
19.	никелирование	0,314	0,14	0,503	0,062	0,551	0,041

Пример 1. Пусть по служебному назначению детали требуется найти метод упрочнения  $\mu_0$ , обеспечивающий получение следующих эксплуатационных параметров:  $X_1^{(0)}=50$ ;  $X_2^{(0)}=2$ ;  $X_3^{(0)}=10$ ;  $X_4^{(0)}=0,2$ . Зададимся степенью важности  $\rho_j, j = 1, m$  каждого параметра:  $\rho_1=0,5; \rho_2=0,3; \rho_3=0,1; \rho_4=0,1$ .

По алгоритму (рис. 2), рассчитываются значения минимизирующего функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  для каждого, содержащегося в базе данных (табл. 1), метода упрочняющей обработки. Результаты расчётов приведены на рис. 3,а. Из рис. 3,а видно, что минимальное значение функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  имеет метод упрочняющей обработки  $\mu_9$  - наплавка электроимпульсная. Близкие значения к  $\min F(\mu_i, \mu_0)$  имеют методы обработки  $\mu_{12}$  и  $\mu_{15}$ , соответственно, наплавка индукционная и наплавка ручная (электродами), причём из них предпочтение имеет метод  $\mu_{12}$ , так как, в соответствии с табл. 2, он имеет меньшее рассеивания значения интегрального показателя потребительской ценности  $\Delta U(X)$ .

Пример 2. Пусть по служебному назначению детали требуется найти метод упрочнения  $\mu_0$ , обеспечивающий получение следующих эксплуатационных параметров:  $X_1^{(0)}=30$ ;  $X_2^{(0)}=5$ ;  $X_3^{(0)}=3$ ;  $X_4^{(0)}=0,1$ . Зададимся степенью важности  $\rho_j, j = 1, m$  каждого параметра:  $\rho_1=0,5; \rho_2=0,3; \rho_3=0,1; \rho_4=0,1$ .

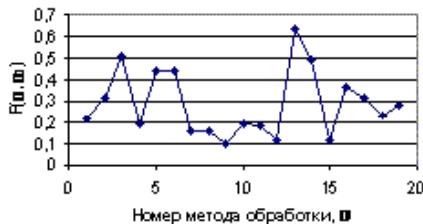
По алгоритму (рис. 2), рассчитываются значения минимизирующего функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  для каждого, содержащегося в базе данных (табл. 1), метода упрочняющей

обработки. Результаты расчётов приведены на рис. 3,б. Из рис. 3,б видно, что минимальное значение функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  имеет метод упрочняющей обработки  $\mu_1$  - металлизация плазменно-дуговая. Близкие значения к  $\min F(\mu_i, \mu_0)$  имеют методы обработки  $\mu_3$  и  $\mu_{10}$ , соответственно, металлизация высокочастотная и наплавка вибродуговая, причём из них предпочтение имеет метод  $\mu_3$ , так как, в соответствии с табл. 2, он имеет меньшее рассеивания значения интегрального показателя потребительской ценности  $\Delta U(X)$ .

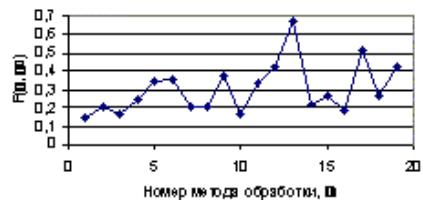
Пример 3. Пусть в процессе проектирования или производства деталей, по исходным данным примера 1, повысились требования к производительности и экономичности процесса упрочняющей обработки. Проектировщик задаётся новыми значениями степени важности  $\rho_j, j = 1, m$  каждого параметра:  $\rho_1 = 0,1; \rho_2 = 0,1; \rho_3 = 0,3; \rho_4 = 0,5$ .

По алгоритму (рис. 2), рассчитываются значения минимизирующего функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  для каждого, содержащегося в базе данных (табл. 1), метода упрочняющей обработки. Результаты расчётов приведены на рис. 3,в. Из рис. 3,в видно, что минимальное значение функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  имеет метод упрочняющей обработки  $\mu_7$  - наплавка порошковыми проволоками. Близкие значения к  $\min F(\mu_i, \mu_0)$  имеют методы обработки  $\mu_4$  и  $\mu_{11}$ , соответственно, металлизация газовая и наплавка плазменная, причём из них предпочтение имеет метод  $\mu_4$ , так как, в соответствии с табл. 2, он имеет меньшее рассеивания значения интегрального показателя потребительской ценности  $\Delta U(X)$ .

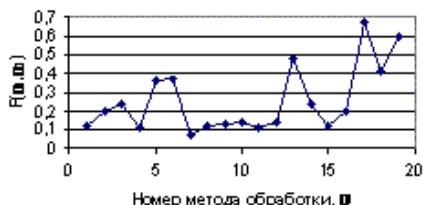
Таким образом, алгоритм принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки детали достаточно чётко реагирует на изменение условий выбора, задаваемых проектировщиком.



a)



б)



в)

Рис. 3. Расчётные значения минимизирующего функционала  $F(\mu_i, \mu_0)$  для значений: а)  $X_1^{(0)}=50$ ;  $X_2^{(0)}=2$ ;  $X_3^{(0)}=10$ ;  $X_4^{(0)}=0,2$  при  $\rho_1=0,5$ ;  $\rho_2=0,3$ ;  $\rho_3=0,1$ ;  $\rho_4=0,1$ ; б)  $X_1^{(0)}=30$ ;  $X_2^{(0)}=5$ ;  $X_3^{(0)}=3$ ;  $X_4^{(0)}=0,1$  при  $\rho_1=0,5$ ;  $\rho_2=0,3$ ;  $\rho_3=0,1$ ;  $\rho_4=0,1$ ; в)  $X_1^{(0)}=50$ ;  $X_2^{(0)}=2$ ;  $X_3^{(0)}=10$ ;  $X_4^{(0)}=0,2$  при  $\rho_1=0,1$ ;  $\rho_2=0,1$ ;  $\rho_3=0,3$ ;  $\rho_4=0,5$ .

Рассмотренные теоретические подходы были использованы [7] при создании интеллектуальной системы

поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР.

- 
1. Попов М.Е. Основы САПР технологических операций упрочняющей обработки: учеб. Пособие. Ростов-на-Дону: РИСХМ. 1987. 91 с.
  - Попов М.Е. Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД// Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №7. с. 11-20
  2. Попов М.Е. Формализованное описание структуры базы данных методов упрочняющей обработки в интегрированных САПР// Вестник ДГТУ. Серия "Проблемы производства машин". Ростов-на-Дону, 2000. с.88-91
  3. Горелова Г.В., Здор В.В., Свечарник Д.В. Метод оптимума номинала и его применение. М.: Энергия. 1970. 200 с.
  4. Попов М.Е., Попов А.М. Разработка и постановка продукции на производство на основе структурирования функции качества // Вестник машиностроения
  5. Маслов Н.Н. Эффективность и качество ремонта автомобилей. М.: Транспорт. 1981. 304 с.
  6. Попов М.Е., Абухарб М., Эль-Диб Н. Свидетельство № 2012660967 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированная система поддержки принятия решений при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР». Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.12.2012 г.

**УДК 621.77.539.37**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ППД**

*Попов М.Е., Эль Даудки Ахмад  
ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

Работа машин и агрегатов современной техники происходит с возрастающими скоростями и нагрузками, при высоких и низких температурах, в агрессивных средах и вакууме. Наряду со стремлением к упрощению и удешевлению разрабатываемых конструкций, повышаются требования к их надёжности и долговечности. В этих условиях всё большее применение находят упрочняющие методы обработки поверхностей деталей машин [1,2].

Вследствие недостаточно обоснованного выбора материала и технологии его упрочняющей обработки сроки службы машин и агрегатов уменьшаются, возрастает

количество ремонтных работ, и, как следствие, снижается производительность из-за дополнительных простоев оборудования.

В зависимости от условий эксплуатации деталей машин методы упрочнения можно условно разделить на следующие группы (рис. 1, табл. 1).



Рис. 1. Методы упрочнения деталей машин

Из трех указанных в таблице 1 групп методов упрочнения, к первой относятся все методы поверхностного пластического деформирования (ППД), термической, химико-термической (ХТ) и термомеханической (ТМ) обработки. Применение этих методов вызывает деформационные, структурные, фазовые изменения или изменения по химическому составу поверхностного слоя однородного материала детали.

Ко второй группе относятся методы, связанные с нанесением различных твердых покрытий из самых разнообразных материалов (металлов, сплавов, керамики, пластмасс), в результате чего физико-химическое состояние

поверхностного слоя может значительно отличаться от основного материала детали. К ним относятся наплавка и напыление, электролитические и химические покрытия, покрытия полимерными материалами, плазменные покрытия и т.д.

К третьей группе относятся методы комбинированные, включающие одновременно два или более методов, принадлежащих к различным группам (например, нанесение покрытия наплавкой с последующим ППД).

Таблица 1.

Методы упрочнения

Условия эксплуатации	Методы технологического воздействия (упрочнения)
Циклические нагрузки, требующие высокой усталостной прочности материалов	Силовое и тепловое воздействие на поверхностные слои деталей машин для их упрочнения
Износ различных видов, требующий высокой износостойкости материалов	Методы защиты поверхности, улучшающие триботехнические свойства поверхности
Сложные условия циклических нагрузений с одновременным изнашиванием отдельных поверхностей	Комбинированные методы технологического воздействия

В данной работе представлены результаты исследования технологических возможностей повышения качества хромовых электролитических покрытий методами поверхностного пластического деформирования (ППД).

Качество электролитического покрытия зависит от материала детали, материала покрытия, шероховатости исходной поверхности перед покрытием, толщины покрытия, режимов нанесения покрытия и других факторов.

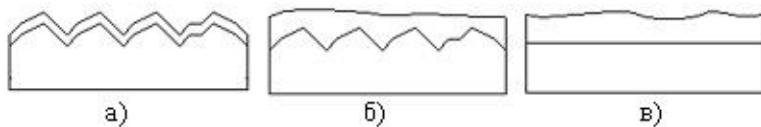


Рис. 2. Толщина электролитических покрытий в зависимости служебного назначения поверхности детали

Толщина хромовых электротехнических покрытий определяется служебным назначением покрытия поверхности детали. В соответствии с этим будет различной и толщина требуемого покрытия. Различают антикоррозионные покрытия (рис. 2,а), износостойкие покрытия (рис. 2,б) и покрытия для восстановления изношенных поверхностей детали (рис. 2,в).

Проведены исследования влияния режимов обкатывания роликом [3,4] на качество хромовых покрытий толщиной 5 и 10 мкм (рис. 3, рис. 4, рис. 5).

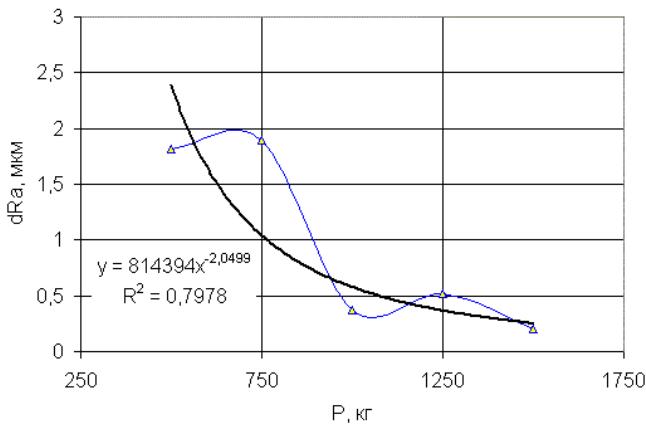


Рис. 3. Зависимость  $dRa=F(P)$  при обкатывании роликом хромового покрытия толщиной 5 мкм

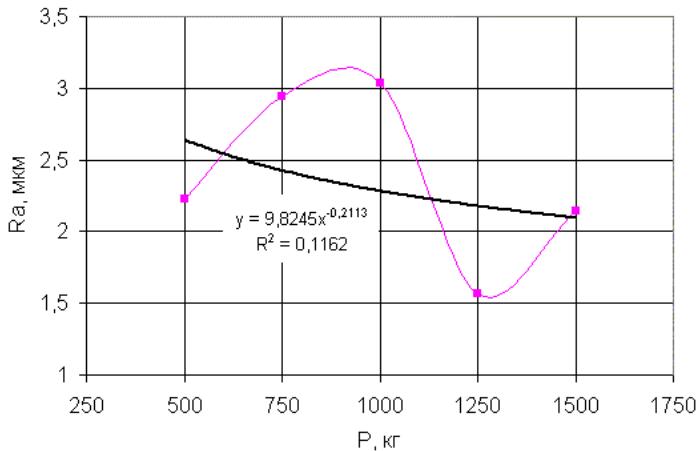


Рис. 4. Зависимость  $R_a=F(P)$  при обкатывании роликом хромового покрытия толщиной 10 мкм

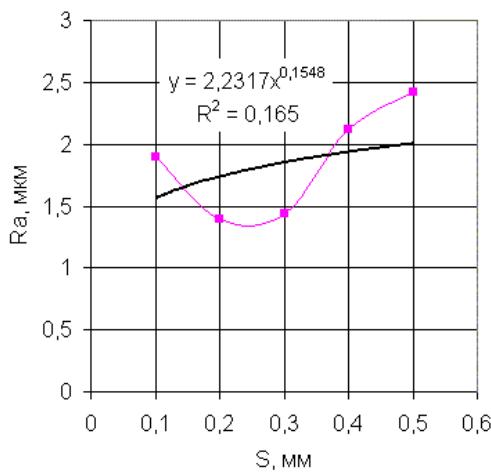


Рис. 5. Зависимость  $R_a=F(S)$  при обкатывании роликом хромового покрытия толщиной 5 мкм

Из рис. 3 видно, что с увеличением усилия обкатывания, при толщине покрытия 5 мкм, происходит интенсивное уменьшение шероховатости исходной поверхности  $dR_a = (R_{a_{\text{исп}}} - R_a)$ . При толщине покрытия 10 мкм интенсивность снижения шероховатости меньше (рис. 4).

Значительное влияние на шероховатость поверхности покрытия после обкатывания оказывает подача S (рис. 5).

Таким образом, как показали результаты исследований, наибольшее влияние на шероховатость поверхности хромового покрытия влияют величины подачи, усилия обкатывания и толщины покрытия.

Для антикоррозионных покрытий толщина покрытия меньше или равна шероховатости поверхности до нанесения покрытия, для износостойких покрытий толщина покрытия сопоставима с величиной шероховатости, а для покрытий при восстановлении изношенной детали толщина покрытия на порядок превосходит величину шероховатости поверхности под покрытие. Эти особенности определяют характер напряженно деформированного состояния и особенности пластического течения металла поверхностного слоя детали при его поверхностном пластическом деформировании. Большое влияние на этот процесс оказывает марка основного металла детали и способ получения её заготовки [5].

Задачами дальнейших исследований является выявление особенностей механики поверхностного пластического деформирования поверхностей деталей машин с электролитическими покрытиями из различных материалов, обработанных различными методами ППД, выявление влияния обработки методами ППД на эксплуатационные свойства поверхностей с электролитическими покрытиями.

- 
1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием.- М.: Машиностроение, 1987. -311 с.
  2. Попов М.Е. Основы САПР технологических процессов упрочняющей обработки: Учеб. пособие./РИСХМ. -Ростов н/Д. 1987.- 91с.
  3. Попов М.Е., Аваниш А. Финишная обработка прецизионных поверхностей осциллирующим инструментом//Вестник ДГТУ, 2002, №1, с. 40-50

4. Попов М.Е., Аваниш А. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей осциллирующим инструментом//СТИН, 2003, № 11, с. 34-36

5. Попов М.Е. Основы ресурсосберегающей технологии: Учебное пособие. Ростов н/Д, РИСХМ, 1991. - 87 с.

**УДК 681.7.023.72**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОВОДКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВВЕДЕНИЕМ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

*Маляренко А.Д., Митенков М.В.  
БНТУ, г. Минск, Белоруссия*

Одним из путей интенсификации процессов доводки оптических деталей является введение в зону обработки дополнительной энергии в виде механической энергии [1]. Применение данного метода осложнено необходимостью использования специального оборудования и приспособлений.

Целью проведенных исследований был поиск оптимальных конструкций притиров, позволяющих создать в зоне обработки дополнительных колебаний исключив затраты на оборудование.

Для решения данной задачи были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния конструкции притира на точность обработки оптических деталей и время, необходимое для удаления дефектного слоя с поверхности обрабатываемой оптической детали.

В качестве объектов исследований использовали притиры с уменьшающейся от центра к краю толщиной из бронзы БрОЦС 4-4 ГОСТ 5017-74 с одним, двумя, тремя и четырьмя продольными радиальными разрезами. На внутреннюю поверхность корпусов притиров наклеивались полировальные подложки из пенополиуретана ППМ-1-1 ТУ ОП.004 толщиной 1 мм. Точность формы полированных обработанных поверхностей оптических деталей при температуре полировальной сuspензии 22 °C составляла  $N=3..5$ ,  $\Delta N=0,3..0,5$  интерференционных кольца. Контроль осуществлялся при температуре 19-20 °C с

помощью рабочего пробного стекла. Методика проведения исследований представлена в [1].

В результате исследований установлено, что наличие разрезов на притире уменьшает время, необходимое для снятия дефектного слоя вследствие различных деформаций корпусов притиров.

При обработке притиром с одним разрезом (кривая 2 рис. 1а) во всем диапазоне температур ( $16\div40^{\circ}\text{C}$ ) изменение общей погрешности формы находилось в интервале  $N=2\div5$  интерференционных кольца с выраженным максимумом ( $N=5$  колец) при температуре  $30^{\circ}\text{C}$ .

Более высокая точность обработанных поверхностей ( $N=2,5\div4$  интерференционных кольца) получена при обработке притиром с двумя разрезами (кривая 3 рис.1а). Максимальная погрешность - 4 интерференционных кольца наблюдалась при температуре  $28^{\circ}\text{C}$ . Местная погрешность формы  $\Delta N$  для деталей, обработанных притирами с одним и двумя разрезами колеблется от 0,3 до 0,5 интерференционных кольца.

При обработке деталей притирами с тремя разрезами (кривая 4 рис.1а) замечены максимумы на температурах 24 и  $36\cdot\text{С}$ . Точность обработки составила  $N=2\cdot6$  интерференционных кольца.

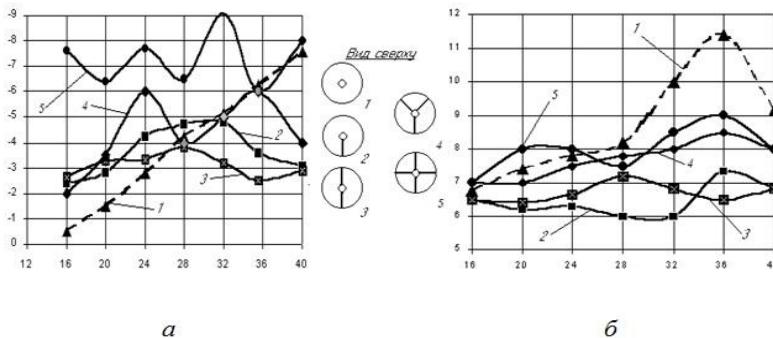


Рис. 1. Влияние температуры полированной суспензии на общую погрешность формы (а) и время схода матового слоя (б) при обработке притирами: 1 - без разрезов; 2 - с одним разрезом; 3 - с двумя продольными осевыми

Местная погрешность формы  $\Delta N$  колеблется, при этом, в более широком диапазоне (от 0,4 до 0,8 интерференционных кольца). Минимальной точностью ( $N=4\text{--}9$  интерференционных кольца) обладали детали, обработанные притиром с четырьмя разрезами (кривая 5 рис.1а). Максимум наблюдается на температуре 32°C. Местная погрешность формы  $\Delta N$  не превышала 0,7.

Время обработки, необходимое для удаления дефектного слоя уменьшается до 80-100%, если использовать притиры с разрезами. Это иллюстрируется рисунком 1б. На температурах больших 30°C при обработке притирами стандартной конструкции (без разрезов (кривая 1)) время, необходимое для удаления дефектного слоя достигает 11-12 минут. Обработка притирами с одним и двумя (кривая 2 и 3 рис. 1б) разрезами позволяет снизить это время на 4-5 минут и на 3 минуты при обработке деталей притирами с тремя разрезами (кривая 4 рис. 1б). Наличие у притира четырех разрезов показало: при температурах меньших 25°C время, необходимое для снятия дефектного слоя несколько увеличивается.

Общее уменьшение времени, необходимое для устранения дефектного слоя можно объяснить наложением колебаний в процессе обработки из-за неравномерной деформации корпусов притиров с разрезами. Этим можно также объяснить их нелинейные зависимости точности от температуры полировальной супспензии.

Изменения частот и интенсивностей звуковых сигналов, наблюдаемых во время обработки, показали наличие общей частоты равной 2274-2649 Гц при уровне сигнала до -25 dB. На данной частоте, таким образом, происходит доводка оптических деталей, как притирами без разрезов, так и притирами с переменной радиальной жесткостью.

При наличии разреза на притире заметно появление дополнительных звуковых частот более низкого звукового диапазона. Более интенсивны сигналы при частоте 1454 Гц (уровень сигнала -37 dB) и 915 Гц (уровень сигнала -27 dB). Заметны колебания и на частоте 399 Гц (уровень сигнала -36 dB). Увеличение числа разрезов на притире не изменяют существенно звуковой картины, наблюдаемой в процессе обработки. Поэтому, сопоставляя результаты исследований, для повышения производительности процесса доводки высокоточных

оптических поверхностей достаточно использовать притиры с одним разрезом.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Наличие разрезов в конструкции притира оказывает влияние на стабильность получения заданных точностных показателей поверхности вследствие различных деформаций корпусов притиров.
2. Время обработки, необходимое для удаления дефектного слоя уменьшается до 80-100%, если использовать притиры с одним (двумя) разрезами.
3. При обработке притиром с одним и двумя разрезами в диапазоне температур от 16 до 40°C точность обработанных поверхностей составила  $N=2\div4$  интерференционных кольца.
4. Увеличение числа разрезов (больше двух) на притире нецелесообразно.

---

1. Куманин К.Г. Формообразование оптических поверхностей// Сборник статей. - М.: Оборонгиз, 1962 – 432 с.

2. Маляренко А.Д., Митенков М.В., Шамкалович В.И. Влияние конструкции притира на стабильность термоуправляемой доводки прецизионных поверхностей// Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. Сб. Научн. Трудов. – Донецк: ДГТУ, 2000, - Вып. 13 – с. 259-263

## **УДК 621.923**

### **ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПЛОСКОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА**

*Василенко О.А., Тюхта А.В., Василенко Ю.В.*

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел, Россия

Известно, что аэрогидродинамические явления, сопровождающие процесс шлифования влияют в значительной степени на качество поверхностного слоя обрабатываемой детали и ее структуру, а значит на физико-механические свойства готового изделия, на количество проходящей через зону резания СОЖ, износ и засаливание шлифовального круга, на температурный режим в зоне резания и другие технологические факторы [2].

Исследования аэродинамической обстановки в рабочей зоне плоскошлифовального станка проводились и ранее [1,2], однако они были направлены на исследование отдельных участков рабочей зоны и не имели обобщающего характера. Проведенное исследование носит более обобщенный характер.

За рабочую зону принималось пространство, ограниченное в вертикальной плоскости сторонами защитного кожуха, а в горизонтальной плоскости - столом станка и краем кожуха.

Исследование проводилось на станке модели ЗЕ711ВФ1 с кругом 1 250x40x76 24АF40К9V35A1,  $V_{kp} = 35$  м/с,  $V_{pr} = 5$  м/мин. Эскиз рабочих органов станка показан на рисунке 1.

Для измерения направления и скорости движения воздушных потоков применялись: прибор дифманометр МР 200, трубка Пито (рисунок 2).

Принцип работы дифманометра МР 200 заключается в измерении давления воздуха в потоке при помощи встроенного датчика давления (рисунок 3). Для индикации давления воздуха, трубку Пито вводят в зону проводимых измерений, вращением в заданной точке определяют направление и фиксируют результат – давление, на табло базы прибора. После индикации давления воздуха, база прибора аналитически вычисляет скорость потока воздуха по формуле:

$$V = k \cdot \sqrt{\frac{1}{P_o} \cdot \Delta P_d} \quad (1)$$

где  $P_d$  – полное давление, Па;

$P_o$  – барометрическое давление, Па;

$k$  – коэффициент трубки Пито.

При проведении исследований выделено три характерных плоскости, в которых формируются интенсивные воздушные потоки. Прибор позволяет поддерживать до 8000 точек измерения и 6 измерений одновременно, проводя по ним вычисление средней скорости потоков воздуха в определенной зоне. Потоки: плоскость стола (А), край кожуха (С) и плоскость, проходящая по обрабатываемой поверхности заготовки (В) (рисунок 4).

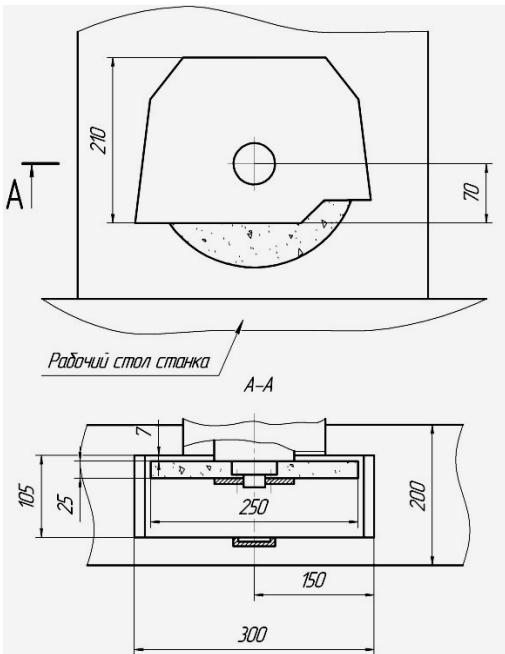


Рисунок 1 – Эскиз рабочих органов станка ЗЕ711ВФ1



Рисунок 2 – Дифманометр MP 200, трубка Пито

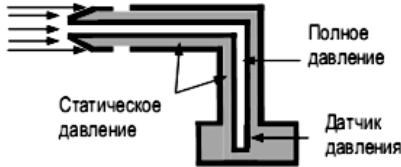


Рисунок 3 – Принцип работы дифманометра MP 200

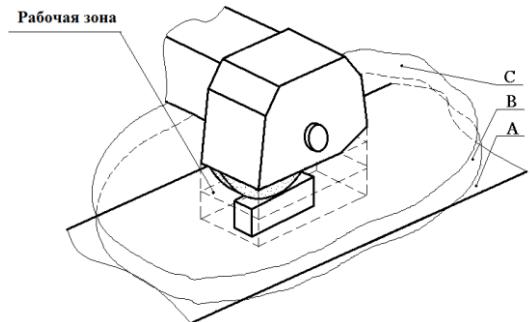


Рисунок 4 – Общий вид исследуемого пространства и характерные плоскости

Установлено, что при выходе воздушных потоков из-под кожуха, образуется центр наддува. Сущность этого явления

заключается в том, что направление движения воздушных потоков в плоскости А совпадает с направлением лучей, исходящих из центра наддува. Он находится на проекции торца круга, на расстоянии 10-15 мм от проекции периферийной поверхности круга (рисунок 5).

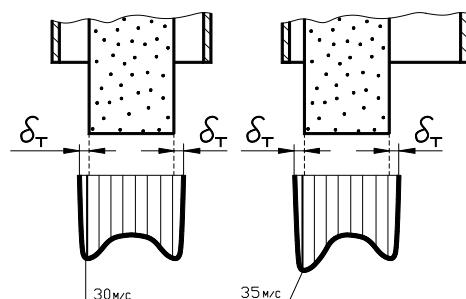
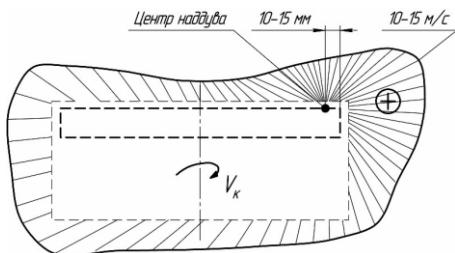


Рисунок 5 – Эпюра скоростей движения воздушных потоков в плоскости А

Рисунок 6 – Радиальные эпюры скоростей движения воздушных потоков около врачающегося шлифовального круга:  
а) заточного станка;  
б) плоскошлифовального станка

Образование центра наддува объясняется конструкцией защитного кожуха станка. В работах [5, 6] рассмотрен механизм формирования воздушных потоков около врачающегося шлифовального круга и доказано, что при работе торцевые поверхности круга, захватывая одинаковый объем воздуха, создают торцевые воздушные потоки толщиной  $\delta_T$ . В работе [5] установлен закон распределения скорости воздушных потоков на периферии круга заточного станка (рисунок 6, а). У плоскошлифовального станка за счет торцового смещения абразивного круга относительно кожуха эпюра скоростей изменяется (рисунок 6, б), что подтверждается и в работе [2]. Под кожухом воздушные потоки в малом зазоре движутся ламинарно и достигают скорости круга. Поэтому при выходе из-под кожуха эти потоки, обладая максимальной скоростью, доминируют при движении вдоль плоскости А.

Из-за высокой скорости часть потоков в зоне наддува отражается от поверхности стола (рисунок 7).

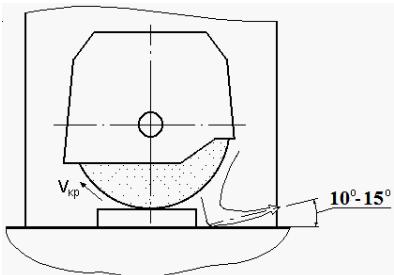


Рисунок 7 – Отражение воздушных потоков в плоскости А

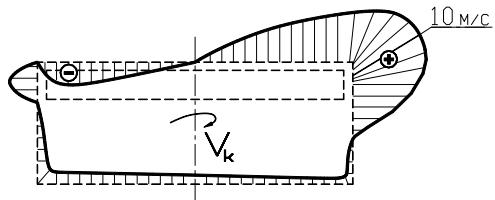


Рисунок 8 – Эпюра скоростей воздушных потоков в плоскости С

Вдоль обрабатываемой поверхности заготовки воздушные потоки, вне зоны резания, движутся под углом  $10-15^{\circ}$  к кругу ламинарно со скоростью  $5-15 \text{ м/с}$ , в зависимости от расстояния до абразивного круга.

Установлено, что в широкой части клина, образованного обрабатываемым изделием и шлифовальным кругом, воздух имеет турбулентное движение, а по мере приближения к узкой части клина приобретает направленное ламинарное движение, что подтверждается исследованиями [2, 4].

Эпюра скоростей движения воздушных потоков в плоскости С показана на рисунке 8. Представляет интерес наличие избыточного давления в зоне входа круга под кожух. Это объясняется малым зазором между абразивным кругом и защитным кожухом и вентиляторным эффектом круга.

Таким образом, на основании полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. При плоском шлифовании периферией круга воздушные потоки в рабочей зоне станка движутся не хаотично, а подчиняются определенным закономерностям, вытекающим из расположения круга относительно защитного кожуха.

2. Как правило, у плоскошлифовальных станков шлифовальный круг располагается ассиметрично относительно кожуха, что обуславливает неравномерность в распределении скоростей периферийных воздушных потоков и образование

центра наддува, определяющего направление движения воздушных потоков у поверхности рабочего стола станка.

Представленные выше закономерности были учтены при проектировании средств улавливания и нейтрализации отходов шлифования, движущихся из-под кожуха станка в комбинаторном способе подачи СОЖ [3], а также планируются к использованию при совершенствовании данного способа.

- 
1. Василенко, Ю.В. Совершенствование техники применения СОЖ при плоском шлифовании на основе закономерностей ее поведения в рабочей зоне: автореф. дис. ... канд. тех. наук. 05.02.08 / Василенко Юрий Валерьевич. – Брянск, 2002 – 24 с.
  2. Туromша, В.И. Исследование влияния гидродинамических и кавитационных явлений на процесс резания и качество обработанной поверхности при тонком шлифовании: дис. ... к.т.н.: 05.03.01 / Туromша Вячеслав Иванович. – Минск, 1982. – 250 с.
  3. Тюхта, А.В. Практическое применение комбинаторного способа подачи СОЖ. / А.В. Тюхта // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. – 2012. – Ч.2. С. 24–29.
  4. Худобин, Л.В. Анализ гидроаэродинамики шлифования кругами прямого профиля / Л.В. Худобин, В.Н. Шумилин // Интенсификация процессов абразивной обработки и повышения качества деталей. – 1988, – С. 68–76.
  5. Шумилин, В.Н. Повышение эффективности процесса шлифования за счет направленного формирования гидроаэродинамической обстановки в зоне обработки / В.Н. Шумилин: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ульяновск, 1991. – 18 с.

## **УДК 621.77.04**

### **МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОПРЕССОВКА, ПОД ПОСЛЕДУЮЩУЮ ПАЙКУ**

*Лемешев С.В., Агеев С.О., Рачков М.А., Перлов Д.С., Стрижаков Е.Л.*

ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия

Составные металлокерамические и металлостеклянные узлы (МКУ и МСУ) являются корпусными и изоляционными элементами электровакуумных СВЧ приборов, резисторов, предохранителей и других изделий электронной техники (рис. 1), обеспечивающих работоспособность конструкций при рабочих напряжениях более 10 кВ и интенсивных тепловых нагрузках. При обработке МКУ и МСУ механическими методами –

обжим кулачками или обкаткой роликами – возникают очаги концентрации напряжений, которые ведут к разрушению керамического основания, также эти процессы являются трудоемкими.

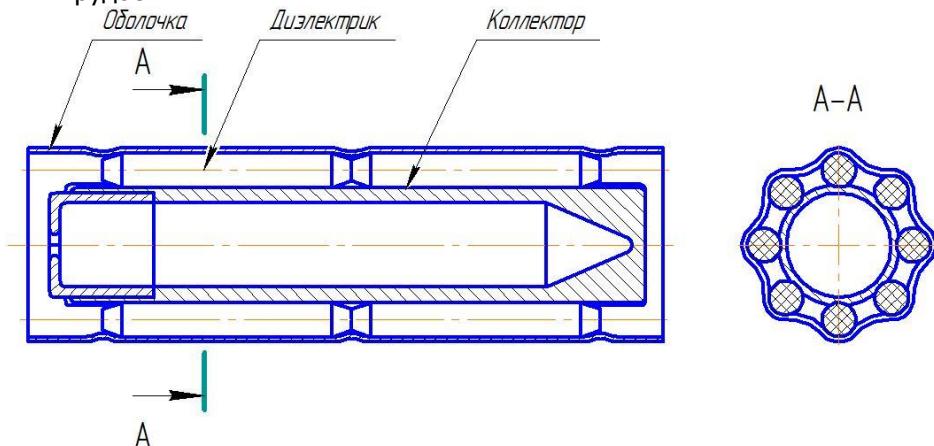


Рис. 1. Многоэлементный металлокерамический узел.

В работах [1, 2] предложено для сборки многоэлементных МКУ использование бесконтактного метода обработки со строгой дозировкой давления импульсным магнитным полем, но это не решало проблему, так как и в этом случае при достижении необходимой конфигурации металлической оболочки в керамических стержнях в результате интенсивного нагружения образуются микротрешины. Схема получения МКУ магнитно-импульсной прессовкой приведена на рис. 2. [3].

Данные условия противоречивы, т.к. необходимо осуществлять значительные конечные перемещения заготовки  $u_k$ , превышающие заданные  $[u]$  при ограничениях  $[v]$  скорости соударения  $v_{cd}$  оболочки с керамикой, ограничениях импульса первой полуволны магнитного давления

$[J_m \max]$  и допустимой минимальной толщины оболочки  $[s]$ . На эмпирической основе установлены критические значения скоростей соударения и импульсов магнитного давления. Для различных материалов керамики их значения находятся в диапазонах:  $v=0,5 - 3$  м/сек;  $J_m = 0,1 - 2 \times 10^3$  Н·с/м<sup>2</sup>.

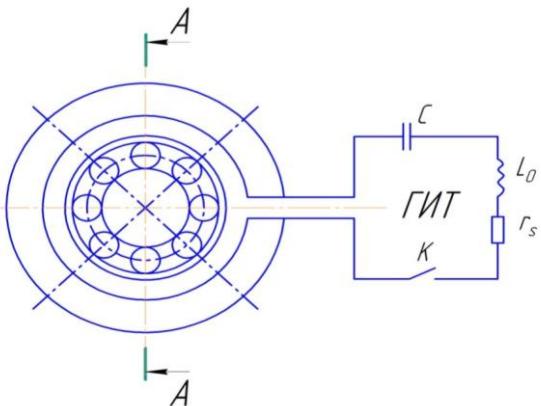


Рис. 2. Схема получения МКУ. 1 – индуктор; 2 – оболочка; 3 – проводящий цилиндр; ГИТ – генератор импульсных токов.

Условия качественной опрессовки металлических оболочек на керамические основания сформулированы в работе [4]:

$$u_k > [u]; v_{cd} \leq [v]; s \geq [s]; J_m \leq [J_{m \max}] \quad (1)$$

Установлено, что условия (1) могут быть реализованы лишь многою переходной обработкой — многократным нагружением с изменением (нарастанием) нагрузки-импульса магнитного давления. Что позволяет избежать образования микротрещин в керамическом основании.

Теоретический анализ процесса опрессовки МКУ осуществлялся численным моделированием на ЭВМ многою переходного магнитно-импульсного воздействия путем многократного решения однопереходной задачи с использованием в качестве исходного состояния равновесного состояния системы, полученное из предыдущего решения. На рис. 3 приведена расчетная схема, конфигурация части конструкции и характер распределения магнитного давления на различных стадиях процесса опрессовки МКУ [5].

В силу циклической окружной симметрии в процессе численных исследований рассматривалась только часть сочетания, имеющая вид сектора с углом раствора  $\alpha$ .

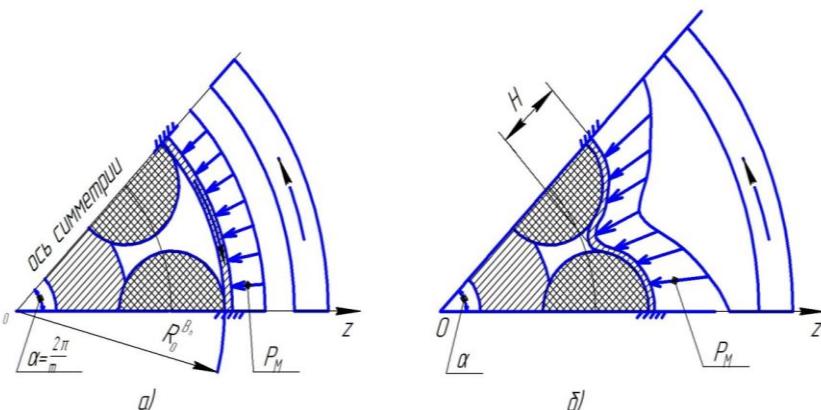


Рис. 3. Распределение магнитного давления в процессе опрессовки МКУ; а) исходное состояние, б) в завершающей стадии, где:  $P_M$  – магнитное давление;  $\alpha=2\pi/m$  – угол раствора;  $m$  – число керамических стержней в конструкции

Теоретический анализ и экспериментальные исследования скоростной фото регистрации процесса опрессовки МКУ показали, что интенсивность изменения в каждом импульсе нагружения практически прекращается после окончания действия первого полупериода нагрузки, что определяет роль импульса первой полуволны магнитного давления в формообразовании. Анализ условий нагружения подтвердил предположение, что обработку необходимо осуществлять сериями импульсов, наращивая прогиб оболочки с учетом того, что от перехода к переходу увеличивается эквивалентная индуктивность системы индуктор-заготовка, уменьшается магнитное давление в зоне деформации, а сопротивление формообразованию в результате деформационного упрочнения (наклева) увеличивается. Вследствие этого, необходимо увеличивать энергию разряда емкостного накопителя установки от перехода к переходу [5, 6].

Дистанционность воздействия, строгая дозировка энергии и осуществление многократного нагружения так же нужны при реализации процессов калибровки металлических манжет

вакуумно-плотных МКУ.

Выводы: В процессе исследования процесса магнитно-импульсной опрессовки были получено представление о протекании процесса опрессовки и открылись возможности оптимизации процесса.

- 
1. Магнитно-импульсная сборка металлокерамических и металлоклеянных узлов. / Е.Л. Стрижаков, А.В. Миненко и др.// Электронная промышленность. 1988. – с. 102-104.
  2. А.с. 1389103 ССР, В21Д 26/14 Способ изготовления металлокерамических изделий/ А.В. Миненко, Е.Л. Стрижаков, В.А. Милов, Ю.И. Синеокий, 1988. .
  3. Стрижаков. Е. Л., Нескоромный С. В. Специальные процессы магнитно-импульсной сварки – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany, 2012. - 152 с.
  4. Е.Л. Стрижаков, Методика расчета и выбора параметров магнитно-импульсной обработки деталей и узлов изделий электронной техники // Электронная техника, серия 7, 1990. – вып. 4. Рукопись депонированная в ЦНИИ «Электроника» № Р-5448.
  5. Особенности магнитно-импульсной сборки составных металлокерамических узлов ЭВП// Е.Л.Стрижаков, А.В.Миненко, В.П.Ефимов// Электронная техника, серия 7, 1988,- вып.I (146) - с.25-27.
  6. Е.Л. Стрижаков, М.М. Арсуноев, С.В. Нескоромный и др. Пайка охватывающих соединений с импульсной нагрузкой// Физика импульсных разрядов в конденсированных средах, Николаев 2013 г. СТР

**УДК 621.9.048.6:621.794**

## **ВЛИЯНИЕ ОБЪЁМНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ (ОИЛУ) НА СТОЙКОСТЬ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

*Пинахин И. А., Аксенова И. С., Черниговский В. А., Ягмурев М. А.*  
Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь,  
Россия

Производственные испытания твердосплавных режущих инструментов, прошедших ОИЛУ [1], были проведены на 8 предприятиях России и Украины.

Всего было испытано 12 партий режущих инструментов с общим количеством 1200 штук. При их проведении нами

контролировалась чистота эксперимента, что заключалось в сравнении результатов испытаний исходного упрочненного инструмента с исходным неупрочненным, упрочненного и неупрочненного после первой переточки, упрочненного и неупрочненного после второй переточки и т. д. Это связано с тем, что в результате заточной операции могли меняться свойства режущих инструментов.

Для оценки стойкости режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, нами были использованы следующие показатели: средняя стойкость инструментов  $\bar{T}$ , коэффициент вариации стойкости  $K_T$ , гамма-процентная стойкость  $T_\gamma$ :

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n},$$

где  $T_i$  – стойкость инструмента при  $i$ -м испытании;

$n$  – число испытаний.

$$K_T = \frac{\sigma}{\bar{T}},$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение

$$T_\gamma = \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot a,$$

где  $a$  и  $b$  – параметры закона Вейбулла.

Таблица 1

Результаты проведения производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов после ОИЛУ

Предприятие	Твердый сплав	Режущий инструмент	$\bar{T}$ , ми н	$K_T$	$T_\gamma$ , мин
1. Ковровский завод имени В.А.Дегтярева	ВК8	Проходные резцы с напайными пластинами	36 74	0,28 0,21	18 38
2. Ставропольский завод автоприцепов	T5K10, T15K6, TT7K12	Проходные резцы с 3-х, 4-х, 5-ти гранными	22 48	0,28 0,09	16 34

		пластинами			
3. Новокраматорский машиностроительный завод	T5K10, T15K6	Проходные резцы с 4-х гранными пластинами	<u>4,4</u> 9,2	<u>0,15</u> 0,1	<u>1,8</u> 4,6
4. ПО "Волгоцеммаш" г. Тольятти	KHT-16	Проходные резцы с напайными пластинами	<u>52</u> 106	<u>0,2</u> 0,15	<u>21</u> 48
5. ОАО СТАПРИ– ставропольский завод поршневых колец	BK8	Проходные резцы с напайными пластинами	<u>34</u> 72	<u>0,24</u> 0,18	<u>26</u> 52
6. ЗАО "КомТех- Плюс" г. Ростов н/Д.	Sandvik	Проходные резцы с 4-х гранными пластинами	<u>48</u> 68	<u>0,12</u> 0,1	<u>28</u> 42
В знаменателе показаны значения $\bar{T}$ , $K_T$ , $T_\gamma$ для режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, в числителе для неупрочненных					

В таблице 1 представлены результаты производственных испытаний твердосплавных резцов. Все данные говорят о росте объемной стойкости инструментов, прошедших ОИЛУ в 1,42 – 2,18 раза (для сплавов российского производства в 2,04 – 2,18 раза). Для всех партий инструментов наблюдается снижение коэффициента вариации стойкости в 1,2 – 3,1 раза. Более существенные результаты имеют место в повышении гамма-процентной стойкости (без учета твердого сплава Sandvik). Так при вероятности 0,9 это повышение происходит в 2,11 – 2,56 раза.

Наибольший эффект использования метода ОИЛУ наблюдался при его использовании для перетачиваемого режущего инструмента. В таблицах 2, 3 приведены условия проведения и результаты производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов, прошедших ОИЛУ, в условиях ОАО «СТАПРИ–ставропольский завод поршневых колец».

Таблица 2

Условия проведения производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов после импульсной лазерной обработки

Предприятие		ОАО «СТАПРИ»
Вид режущего инструмента		Токарный расточной резец $\varphi = 75^0$
Марка твердого сплава		ВК8
Оборудование		Станок 1Е365
Обрабатываемый материал, твердость		ВЧ, НВ 156-197
Состояние обрабатываемой поверхности		Литейная корка
Количество неупрочненных и прошедших ОИЛУ резцов		По 100 шт.
Режимы резания	Глубина $t$ , мм	3,25
	Подача $S$ , мм /об	0,35
	Скорость $V$ , м /мин	37

Результаты производственных испытаний

Таблица 3

Показатель	Неупрочненные					Прошедшие ОИЛУ				
	Период стойкости									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$\bar{T}$	33, 8	33, 6	34, 2	34, 4	34, 0	70, 8	72, 6	73, 8	72, 1	71, 2
$K_T$	0,2 6	0,2 4	0,2 3	0,2 5	0,2 2	0,1 6	0,1 9	0,2 0	0,1 8	0,1 7
$T_\gamma$	28	27	24	26	25	51	52	54	53	50
$\bar{T}_{OILU} / \bar{T}_{UCX}$	-	-	-	-	-	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1
$K_{T_{UCX}} / K_{T_{OILU}}$	-	-	-	-	-	1,6	1,3	1,2	1,4	1,3
$T_{\gamma OILU} / T_{\gamma UCX}$	-	-	-	-	-	1,8	1,9	2,3	2,0 4	2,0

--	--	--	--	--	--	--	--	--

В таблице 2 приведены условия проведения производственных испытаний в условиях ОАО «СТАПРИ-ставропольский завод поршневых колец». Отметим тяжелые условия резания – обработка по литейной корке высокопрочного чугуна.

Как видно из таблицы 3 для прошедших ОИЛУ режущих инструментов наблюдается повышение стойкостных характеристик для каждого периода стойкости (переточки), что подтверждает объемный характер упрочнения. При упрочнении перетачиваемого режущего инструмента очень важным является правильный выбор расстояния от места облучения до главной режущей кромки. Ранее проведенные исследования показали, что степень дефектности структуры твердого сплава ВК8 является наибольшей на расстоянии 18 миллиметров от места облучения. В приведенном случае с учетом расхода материала на износ и переточки выбиралось расстояние от места облучения до главной режущей кромки равное 22 миллиметра, чтобы пик улучшения механических свойств пришелся на середину назначенного ресурса резцов (третий период стойкости).

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Результаты производственных испытаний режущих инструментов из твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6, ТТ7К12, КНТ-16, Sandvik показали повышение стойкости упрочненных инструментов в 1,42 – 2,18 раза, снижение коэффициента вариации стойкости в 1,2 – 3,1 раза, повышение гамма-процентной стойкости 2,11 – 2,56 раза.

2. Снижение коэффициента вариации стойкости и повышение гамма-процентной стойкости говорит о целесообразности использования режущих инструментов, упрочненных ОИЛУ, на автоматических линиях, когда производится принудительная смена инструментов.

---

1. Пинахин И. А., Копченков В. Г., Гончаров В. М. Влияние импульсной лазерной обработки твердосплавных режущих инструментов на эффективность обработки металлов резанием // Вестник ДГТУ.– Ростов н/Д, 2010.– №8. – С. 1235 – 1241.

## **IMPROVED SURFACE QUALITY BY THE PROCESS OF VIBRATORY GRINDING**

*M.A.Djema<sup>1, a</sup>, K. Hamouda<sup>1, b</sup> A. P. Babichev<sup>c</sup>, and D. Said<sup>d</sup>*  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия

The main purpose of this work is the energy saving by reducing friction and minimizing wear to avoid losses by raising these matter properties of nanomaterials on the surface layer. Therefore, we develop approaches for studying the tribological behavior phenomena concerning materials on surfaces of the layers to define the mechanical and tribological properties of materials to improve the surface layer materials of the treated parts. It was used for the vibratory grinding method of chemical mechanical processing surface using technology of low-frequency vibration in the treatment of metal parts in the presence of chemical additives, which have a great influence on the improvement of parameters mechanical, metallographic and geometrical (roughness, fatigue resistance, corrosion resistance, micro and macro hardness, structure) surfaces of mechanical parts. This vibratory finishing process has great advantages such as the treatment of complex mechanical parts, the possibility of processing of parts of different types and forms at the same time. it is also known to be an environmentally friendly process. Thus this work consisted of a surface treatment by vibratory grinding of samples of different materials (steel, aluminum, copper, brass).

---

[1] V.O. Trilissky, The centrifugal rotary processing components / NII mash, M., 1983 – 53 p.

[2] V.V. Panchurin, Strengthening process gear transport cars by centrifugal rotary manner, 1989.-243 p.

[3] V.V.Petrosov, Hardening of parts and tools. MA, Mechanical Engineering, 1977 – 166 p.

**УДК 621.787-2**

## **ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ВСТАВОК ДОРНОВАНИЕМ**

*Исаев А.Н., Федоренко А.А., Лесняк С.В.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия*

Практика эксплуатации машин показывает, что ремонт деталей во многих случаях экономически целесообразнее, чем их изготовление. Упрочняющее–чистовые и формообразующие методы, основанные на деформационном механизме формирования поверхностного слоя, открывают новые возможности восстановления и повышения эксплуатационных показателей широкого круга деталей в машиностроении. В частности, применение проволоки в технологиях нанесения покрытий на поверхности отверстий способствует повышению технического уровня ремонта и изготовления изделий с возможностью его повтора через определенный срок эксплуатации. Для нанесения деформационного покрытия наиболее эффективны методы дорнования и ракатывания отверстий.

На рис. 1 представлены фрагменты деформированных составных образцов с проволочной вставкой после дорнования многозубым дornом. Для элементов составного образца были выбраны следующие материалы: втулка наружная (охватывающая) – сталь 40; втулка внутренняя (охватываемая) – сталь 20; проволочная вставка – сталь 09Г2С. Малоуглеродистая проволока – наиболее пластичная из выбранных материалов. После сборки образцов их отверстия были последовательно обработаны однозубыми дornами с натягами 0,8; 0,4; 0,3 и 0,3 мм/зуб (суммарный натяг  $\delta_0 = 1,8$  мм).

На наружной поверхности охватываемой втулки 2 отчетливо видны глубокие следы внедрения проволоки 1 в ее тело. В данном случае имеет место схема с одной отрицательной (радиальное сжатие) и одной положительной (осевое удлинение) деформациями, равными по величине и противоположными по знаку (плоское деформированное состояние:  $-z = +r$ ), сочетаемой с объемной схемой главных напряжений сжатия с тремя главными сжимающими напряжениями  $+r \dots +t \dots -z$ .

Охватывающая втулка, как это видно по следам деформации, находится в полуупругом состоянии, при котором втулка деформируется упруго, а поверхностный слой – пластиически.

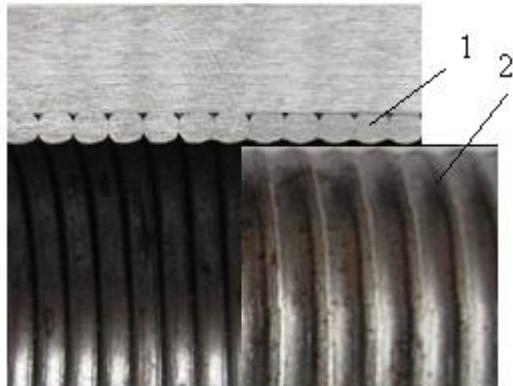


Рис. 1. Составное изделие внутренним цилиндром 2, отделяющим область деформирования проволоки 1 от прямого контакта с инструментом

Напряженно-деформированное состояние материалов элементов составного трехслойного изделия приближенно можно описать схемой на рис. 2. При движении дорна вдоль оси отверстия осевому смещению проволочной вставки на первой стадии деформирования препятствует опора приспособления, а ее смещение в обратную сторону затруднено вследствие закрепления предшествующего витка в винтовом канале, образовавшемся в процессе деформирования. В дальнейшем проволочный виток оказывается защемленным в деформированном канале в состоянии всестороннего сжатия, близкого к равномерному, его деформации во всех направлениях (вдоль оси, в радиальном и тангенциальном) существенно затруднены.

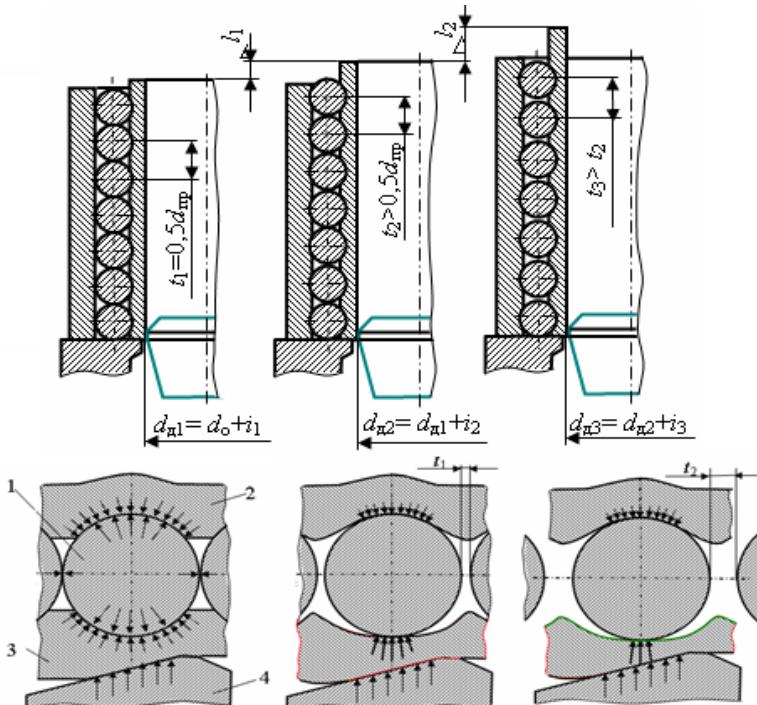


Рис. 2. Схема деформирования составного изделия с проволочной вставкой:  $d_{d1}$ ,  $d_{d2}$ ,  $d_{d3}$  – диаметры дорнующих зубьев;  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$  – приращения длины охватываемой втулки;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  – изменение шага проволочных витков в процессе

Охватываемая втулка на рис. 2, как и проволока, находится в состоянии всестороннего сжатия, и, вследствие малой площади контакта с дном и проволокой, в ее деформируемом кольцевом сечении растут сжимающие радиальные и окружные напряжения, при которых материал втулки в очаге деформирования приобретает высокие пластические свойства и перемещается в свободное пространство между соседними витками, постепенно заполняя его. Толщина стенки охватываемой втулки интенсивно

уменьшается, а ширина выдавленных в процессе деформирования впадин увеличивается при одновременном уменьшении площади контакта проволоки с охватываемой втулкой.

С увеличением натяга дорнования по мере заполнения промежутка между витками проволоки деформируемым металлом охватываемой и, частично, охватывающей втулок осевые напряжения увеличиваются настолько, что обе втулки начинают удлиняться с перемещением к свободному торцу. Удлинение охватываемой втулки намного интенсивнее, поэтому происходит расширение ее деформированных канавок с частичной потерей контакта с проволокой.

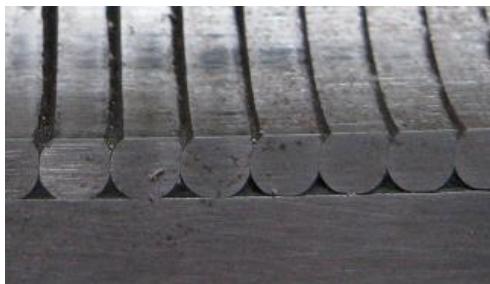


Рис. 3. Составное изделие, образованное при прямом контакте проволоки с инструментом

Механическая схема деформации составного изделия с проволочной вставкой без применения дополнительного внутреннего подпора отличается от описанной выше тем, что инструмент (дорн) оказывает прямое давление на витки проволоки, испытывающих всестороннее сжатие. Так как окружная деформация проволоки отсутствует, возникшее деформированное состояние характеризуется как плоское, при котором радиальное сжатие по абсолютной величине равно осевому растяжению. Сопротивление радиальному смещению металла проволоки наибольшее, поэтому поперечные сечения витков проволоки теряют свою первоначальную круглую форму (рис. 3). При этом металл проволоки в процессе движения инструмента интенсивно заполняет промежутки между витками.

Можно предположить, что смещенный объем деформированного металла в пределе не должен превышать суммарный объем межвитковых канавок и его можно определить по площади продольного сечения очага деформации  $S_k$ , ограниченной дугами окружностей соприкасающихся витков проволоки с опорной поверхностью втулок:

$$S_k = 0,5d_{np}^2 (1 - 0,25\pi).$$

Этому моменту соответствует натяг дорнования, равный диаметру проволоки, поэтому, после подстановки в последнее выражение  $d_{np} = i_{\max}$ , имеем:

$$i_{\max} \leq d_{np} (1 - 0,25\pi)$$

Можно предположить, что предельное напряженно-деформированное состояние наступает при меньшем натяге, чем  $i_{\max}$ , поэтому в формулу предельного натяга необходимо ввести поправку:

$$i'_{\max} = k_i d_{np} (1 - 0,25\pi)$$

Данная формула позволяет устанавливать технологические ограничения режимов деформирования составных цилиндров с проволочной вставкой при изготовлении и ремонте деталей широкой номенклатуры.

- 
1. Исаев А.Н., Лебедев А.Р. Исследование контактных напряжений в процессе локального кольцевого упругопластического деформирования составного цилиндра Вестн. ДГТУ – 2012. №2-2, С.25–31

#### **IV. ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВОГО И ВИБРОВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ; МЕХАНОХИМИЯ ПРОЦЕССОВ; НАНОТЕХНОЛОГИИ**

**УДК621.787.6**

**К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО  
СУММИРУЮЩЕГО ВОЛНОВОДНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ  
ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

*Бабичев А.П., Бирюков Д.Д., Гончаро Д.Д., Медведев М.Н.  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия*

**Введение.** Интерес к ударно-волновым явлениям в металлах и процессах металлообработки обусловлен их широким применением в физике деформационных процессов и все большим проникновением импульсных методов обработки в технологические процессы. Многочисленные работы посвящены проблемам создания прогрессивных технологических процессов на основе использования импульсного деформационного воздействия. Проблема деформации и разрушения материалов упругими импульсами привлекает все большее внимание технологов и конструкторов. В процессах ударного воздействия, в контакте инструмента с обрабатываемой поверхностью (материалом, средой) возникают усилия, в сотни раз превышающие усилия, исходящие от источника ударного импульса. Это достигается благодаря преобразованию постоянного потока подводимой энергии, в дискретную последовательность ударных импульсов, для которых весьма не продолжительное время - порядка  $10^3$  -  $10^4$  с [1,4].

В работе рассмотрена возможность создания волноводного тракта приема-передачи ударных волн от нескольких источников с учетом суммирования их энергии и передачи на обрабатываемую поверхность или объект обработки (объект виброволнового воздействия) по суммирующему стержневому волноводу.

**Разработка многоканального волноводного устройства.** В качестве основы для создания предлагаемого устройства использован опыт разработки конструкции интегрированного

многоканального волноводного устройства антенных радиотехнических систем, описание которого приведено ниже. Рассмотрение и решение упомянутой задачи осуществлялось также с учетом волновых процессов, сопровождающих виброударную обработку (виброударное воздействие). Известно, что вибрационное воздействие на тела и среды различных характеристик сопровождается волновыми явлениями, роль которых при решении технологических задач весьма ощутима [2]. Известно также, что волновым процессам независимо от природы и свойств порождающих их волн присущ ряд закономерностей: отражение и преломление на границе раздела, рефракция при распространении в плавнонеоднородной среде, рассеяние и дифракция на разных неоднородностях среды или на неровностях ее границы, интерференция волн от разных источников [3].

Волны механического происхождения (ударные волны) обладают обычными кинематическими характеристиками: смещением, скоростью, ускорением. На рис.1 представлена конструкция интегрированного волноводного устройства, состоящего из трех двойных Г-мостов и предназначенного для суммирования мощности нескольких входящих в него волноводов. Конструктивно такие узлы разделяют на одноэлементные (узел состоит из одной сложной детали) и многоэлементные.



Рис. 1. Конструкция интегрированного волноводного устройства из трех двойных Г- мостов

Важной характеристикой рассматриваемых устройств является обеспечение уменьшения суммарных погрешностей конечной сборки, снижение массогабаритных показателей и трудоемкости. При реализации волноводного тракта, для обеспечения заданных параметров необходимо по возможности исключить наличие различных стыков и резких перепадов рабочих поверхностей волноводных соединений, что способствует

минимизации потери мощности и точности сигнала. Представленная на рис. 1 конструкция интегрированного устройства состоит из трех двойных Г-мостов, имеющего четыре входа и один выход. На рис. 2 представлена схема конструкции волноводного устройства для интегрированной передачи ударных волн из трех источников (три входа и один выход).

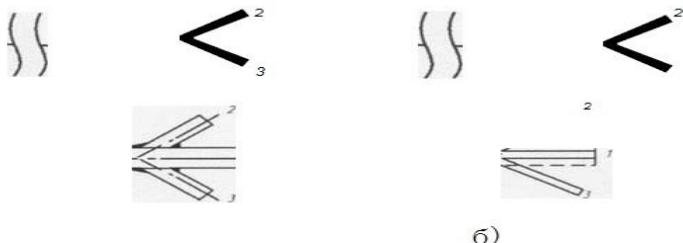


Рис . 2. Схема многоканального волновода конструкции: а) сварной; б) цельной;

Рассматриваются два варианта устройства: 1- сварная конструкция; 2 - цельная (без стыков) конструкция. Первый из них предусматривает центральный стержень (волновод) 1 и два присоединенных к нему боковых приемников ударных импульсов, в виде приваренных коротких «отростков» (стержней) 2 и 3.

**Сравнительные испытания.** Сравнительные испытания вариантов конструкции волноводов 2 и 3 предназначены для установления влияния стыков (сварных соединений) на потери энергии прохождения ударных волн.

Испытания предусматривают получение результатов прохождения ударных волн по схемам:

1. Ударное нагружение по прямому (цельному) волноводу 1;
2. Ударное нагружение по боковому (приваренному) волноводу 2;
3. Тоже по волноводу 3;
4. Одновременное нагружение по каналам 1 и 2 одновременно; Тоже по схеме 1,3 и 2,3.
5. Нагружение (сообщение ударных импульсов) осуществляется пневмоударником КМП-5 (энергия удара 5 Дж) (рис.3).

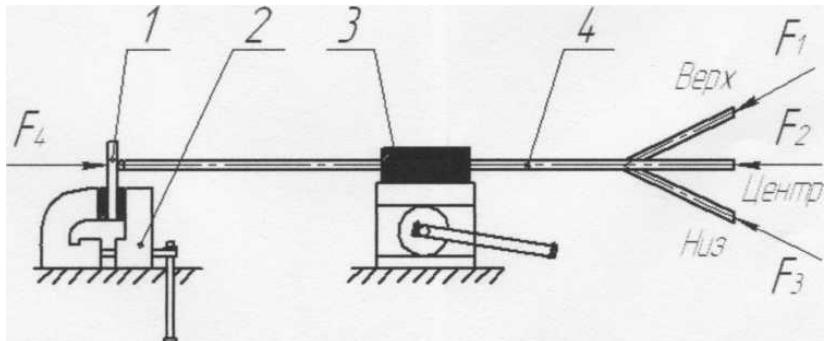


Рис. 3. Схема проведения эксперимента: 1 - образец; 2,3 - тиски; 4- многоканальный волновод;

Контроль результатов производится по величине диаметра пластического отпечатка ( $do$ ). В процессе испытаний (эксперимента) фиксируется (контролируется) контакт рабочей части волновода с обрабатываемой поверхностью (по величине пластического отпечатка) и последующий затем результат нагружения силовой импульсной системы (также по диаметру пластического отпечатка).

Результаты испытаний представлены на рис.4 и в таблице 1. Их анализ показывает, что наибольшее значение диаметра пластического отпечатка  $do$ , отмечается при прохождении ударных волн по центральному (цельному) волноводу 1. При передаче ударных импульсов по схеме центрального и приваренных волноводов 1 (верх) и 1-3 (низ), как и следовало ожидать, отмечается уменьшение  $do$ , что связано с потерей энергии ударных импульсов на границе сварочного шва. Еще более низкие результаты получены при одновременной передаче ударных волн по приваренным волноводам 2-3 (табл. 1). Дальнейшие исследования предусматривают варьирование параметров нагрузений (энергия удара и частоты импульсов) с целью определения условий суммирования энергии волн исходящих из разных источников.

Таблица 1

Изменение диаметра пластического отпечатка  $do$ , в зависимости от канала нагружения и продолжительности воздействия.

Канал нагружения	Продолжительность воздействия, с			
	30	60	90	120
Центральный	1,41	1,405	1,425	1,65
Верхний	1,317	1,348	1,378	1,48
Центральный и верхний	1,373	1,192	1,312	0,866
Нижний и верхний одновременно	0,806	0,68	0,763	0,572

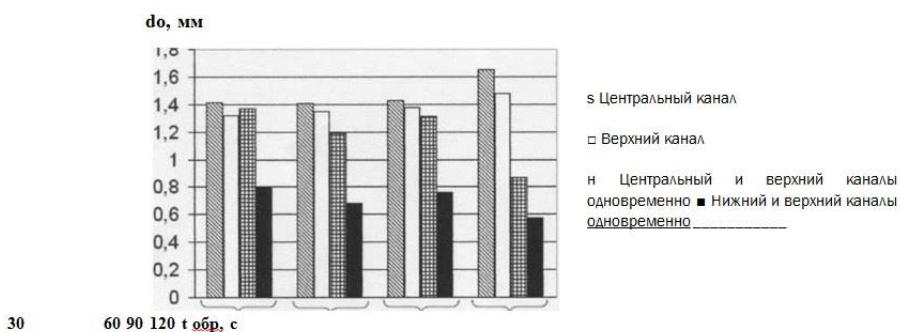


Рис. 4. Зависимость влияния канала нагружения и продолжительности виброударного воздействия на формирование диаметра пластического отпечатка  $do$ .

**Вывод.** Совершенствование процессов и инструментов ударного воздействия, в которых реализованы силовые импульсные системы, предполагает повышение их производительности, улучшение эксплуатационных характеристик инструмента, снижение энергозатрат на осуществление технологического

процесса, а также обеспечение требуемых эргономических и экологических характеристик (в том числе снижение шума и вибрации).

При прочих равных условиях повышение производительности инструмента может быть достигнуто как увеличением передаваемой мощности, так и повышением эффективности передачи энергии на деформирование или разрушение обрабатываемой поверхности. Реализация этих направлений связана с необходимостью поиска средств и способов формирования в системе волн деформаций с рациональными параметрами, которые позволили бы, с одной стороны, передавать по волноводу как можно большую энергию с минимальными потерями, с другой - обеспечивать эффективную передачу энергии деформации в материал обрабатываемой поверхности для решения соответствующей технологической задачи.

---

1. Александров Е.В., Соколинский В.Б. «Прикладная теория и расчеты ударных систем». М. Наука, 1969 - 200с.

2. Ахмадеев Н.Х., Нигматулин Р.Н. «Динамическое разрушение в волнах разгрузки» ДАН СССР - 1982. Т. 266- №5 - с. 1131-1134.

Баскаков В.А. «Пластическое деформирование среды при взаимодействии сдвиговых ударных волн». ПМТФ - 1982, №3 - с. 127-133.

3. Палатник ІІ.С. «О механизме образования вторичных структур при импульсной нагруженности». ДАН СССР - 1970. Т. 191. №3 - с.568-571.

**УДК 621.787.6.004**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОМУ  
ВЫКРАШИВАНИЮ ОБРАЗЦОВ С ГЕТЕРОГЕННОЙ  
СТРУКТУРОЙ ИЗ СТАЛЕЙ 45, 40Х, 35ХГСА**

*Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В.*

Юго-Западный государственный университет", г. Курск,  
Владимирский государственный университет , г. Муром, Россия

Повышение срока службы и несущей способности деталей машин, работающих в условиях периодического контактного нагружения – важная технологическая задача современного машиностроения.

Работоспособность таких деталей определяется сопротивлением их рабочих поверхностей контактно-

усталостным разрушениям. Для ее повышения необходимо создавать упрочненный поверхностный слой с большой глубиной и степенью упрочнения. Результаты современных исследований свидетельствуют о достаточно большом влиянии на интенсивность контактно-усталостного изнашивания поверхностного слоя равномерности его упрочнения. Значительный эффект ранее был достигнут созданием гетерогенно упрочненной структуры, характеризующейся чередованием участков высокой и низкой твердости, полученной термообработкой и химико-термической обработкой [1-4].

Имеются многочисленные примеры использования поверхностного пластического деформирования (ППД) для повышения долговечности. Небольшое, по сравнению с другими распространенными способами упрочнения, количество технологий формирования гетерогенных структур в гомогенных материалах поверхностным пластическим деформированием, объясняется сравнительно небольшим количеством технологических управляемых факторов, ограниченными возможностями создания известными методами ППД глубокого (до 3 мм и более) упрочненного поверхностного слоя.

В связи с этим, для повышения долговечности деталей машин, испытывающих контактные циклические нагрузки, предлагается использовать сравнительно новый способ ППД – статико-импульсную обработку (СИО) [5], которая обладает широкими возможностями варьирования и формирования параметров качества упрочненного поверхностного слоя. Пластическая деформация при СИО является результатом воздействия управляемых ударных импульсов, форма которых адаптирована к свойствам упрочняемого материала и условиям нагружения, что позволяет наиболее эффективно использовать кинетическую энергию бойка. Статическая составляющая нагрузки способствует максимальной реализации импульсной составляющей. В результате обработки на поверхности формируются пластические отпечатки, форма, размеры и коэффициент перекрытия которых определяют глубину, степень и равномерность упрочнения поверхностного слоя, шероховатость поверхности. Глубина упрочненного СИО поверхностного слоя достигает 6...8 мм и более, твердость упрочненного слоя до 6000 МПа. Ранее полученные результаты

свидетельствуют о высокой эффективности гетерогенного упрочнения в повышении сопротивления контактному выкрашиванию [6, 7].

В связи с тем, что стали 40Х, 35ХГСА широко используются в качестве материала тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях контактно-усталостного нагружения, а сталь 45 является эталоном в машиностроении, на сопротивление контактному выкрашиванию испытывались плоские образцы из сталей 45, 40Х, 35ХГСА. Образцы упрочнялись с различными режимами СИО, обеспечивающими гетерогенное упрочнение поверхностного слоя.

В результате выполненного исследования установлено, что наиболее значимыми технологическими факторами, оказывающими наибольшее влияние на величину сопротивления контактному выкрашиванию рассматриваемых материалов, являются энергия ударных импульсов, перекрытие пластических отпечатков и упругопластические свойства материала. Зависимости носят экстремальный характер. Точка экстремума смещается в зависимости от марки стали. При нахождении области оптимума эффективность гетерогенного деформационного упрочнения СИО резко возрастает.

#### **Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №14-08-31263 мол\_а**

- 
1. Патент РФ № 2047661. Способ обработки резьбового изделия. / В.С. Аванесов, Б.А. Авербух, Д.Г. Ашигян и др. 1995.
  2. А.с. № 1782243. Способ термической обработки изделий / А.П. Чейлях, Л.С Малинов. 1992.
  3. Патент РФ 2090828. Противопульная гетерогенная броня из легированной стали для средств индивидуальной защиты и способ ее получения. / Л.А. Кирель, О.М. Михайлова, С.А. Журавлев. 1997.
  4. Патент РФ 2219271. Способ упрочнения сплава на основе железа. / Г.А. Дорофеев. 2003.
  5. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с. (Библ. технologa).
  6. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной структуры // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4. С. 3-10.
  7. Повышение контактной выносимости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В.Киричек,

Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4. С. 3-10.

**УДК 621.793**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЪЁМА МЕТАЛЛА ПО ТЕХНОЛОГИИ  
NVidia CUDA С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D ВИДЕОКАРТ ПРИ  
ВИБРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Копылов Ю.Р., Копылов С.Ю.

ВГТУ, Воронеж, Россия

Приводятся результаты компьютерного трехмерного моделирования съема дефектного поверхностного слоя на примере виброабразивной обработки центробежной крыльчатки с жестким креплением ее в контейнере и с равномерным вращением по технологии NVidiaCUDA с применением 3D видеокарт.

Проблема равномерности съема металла исследуется в связи с необходимостью частичного или полного удаления дефектного поверхностного слоя перед виброударным упрочнения у деталей сложной формы, например, центробежной крыльчатки (рис. 1, а), работающих при ограниченном запасе прочности (1,4-1,5) в связи максимальным ограничением их массы и действием интенсивных эксплуатационных нагрузок. Следует отметить, что здесь не решается проблема повышения съема металла за счет повышения доли микрорезания, который в настоящее время имеет низкие значения и не удовлетворяет условия производства.

Наиболее значимым фактором влияния на равномерность съема металла является изменение амплитуды и несоответствие траектории колебаний конфигурации детали. В меньшей степени на равномерность съема влияют интенсивность подачи технологической жидкости и износ абразивных гранул. В конечном итоге съем зависит от энергии периодических соударений пограничного слоя частиц инструментальной среды с различными участками детали.

Равномерность съема дефектного слоя исследуется посредством трёхмерного сплайнового моделирования. В основе алгоритма лежит метод дискретных элементов и фазовых

траекторий. В трехмерном случае сплайном является элементарная площадка треугольной формы, со сторонами, приближенно равными радиусу частицы инструментальной среды. Эти площадки образуют трехмерную поверхность детали (рис. 2, а).

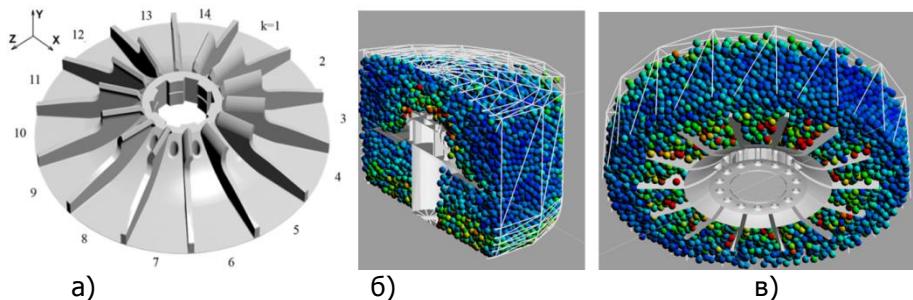


Рис. 1. Трех мерная модель обрабатываемой центробежной крыльчатки (а), разрез технологической системы в плоскости YOZ (б); разрез технологической системы в плоскости X0Z (в)

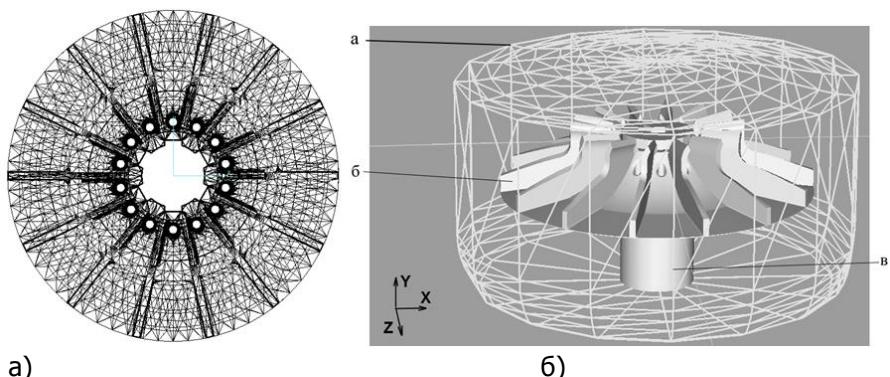


Рис. 2. Трехмерная сплайновая сетка модели рабочего колеса компрессора: а) – трехмерная сплайновая модель рабочего колеса компрессора; б) – трехмерная сплайновая модель технологической системы контейнер-деталь

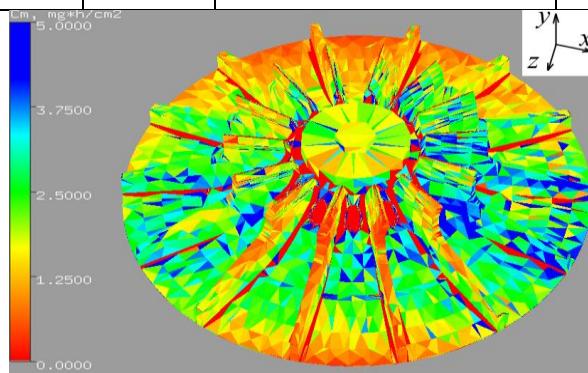
Упрочняемая деталь представляет собой центробежную крыльчатку открытого типа с отверстиями (рис. 1, а). Поверхности детали и контейнера делятся на сплайны – всего 13435 сплайнов (рис. 2). Положение каждой вершины сплайна характеризуется тремя координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Центральная ось крыльчатки при упрочнении имеет вертикальное положение. В численном эксперименте исследуется процесс съема металла при вибраабразивной обработке сферическими абразивными гранулами диаметром 5 мм с зернистостью № 8, 16 и 25 при амплитудах колебаний контейнера 0,35 мм, 0,43 мм и 0,50 см. Виброударное упрочнение осуществляется стальными шариками из стали ШХ15 диаметром 5 мм. Траектория колебаний расположена в плоскости  $XOY$ . Коэффициент загрузки на всех режимах 0,75 – всего 22136 частиц. Сводная информация о режимах обработки приведена в таблице 1.

Таблица 1

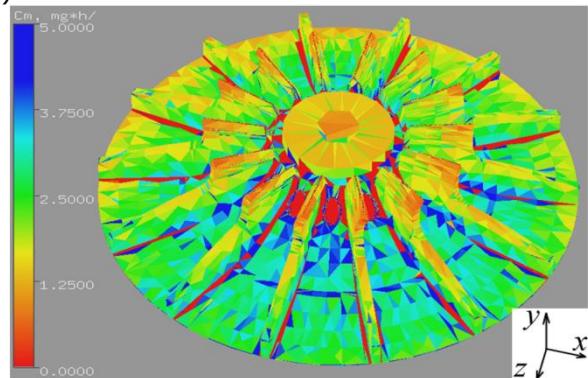
Режимы вибраабразивной обработки и виброударного упрочнения крыльчатки компрессора (с вращением – к № режима добавляется индекс «в»)

Общие параметры колебаний на всех режимах	Номер режима	Амплитуда колебаний, см	Номер абразива
<b>Вибраабразивная обработка</b>			
Частота 150 $\text{с}^{-1}$ ; траектория колебаний контейнера с деталью плоская круговая; без вращения детали; исходная шероховатость $Rz_{\text{исх}} = 40 \text{ мкм}$ .	1	0,35	8
	2		16
	3		25
	4	0,43	8
	5		16
	6		25
	7	0,50	8
	8		16
	9		25
<b>Виброударное упрочнение</b>			
Частота 150 $\text{с}^{-1}$	10	0,35	–

траектория плоская круговая, без вращения детали, $Rz_{исх} = 20$ мкм.	11	0,43	-
	12	0,50	-



a)



б)

Рис. 3. Цветовая эпюра трехмерного сплайнового распределения съема при вибраобразивной обработке крыльчатки без вращения (а) и вращением (б)

Среднее значение съема металла составляет 3,32 отклонение 2,73 Коэффициент вариации 82,22%, что говорит о большой неравномерности съема металла при вибробразивной обработке без вращения.

На рис. 3 представлена цветовая эпюра трехмерного сплайнового распре-деления съема металла без вращения (рис. 3, а) и с вращением (рис. 3, б). При обработке баз вращения, плоскость траектории колебаний расположена вертикально по координатам X0Y, проходит слева на право по поверхности детали. В этом же направлении расположены синего цвета сплайны, в которых съем максимальен. На сплайнах в плоскости Z0X, расположенных перпендикулярно плоскости траектории колебаний, съем металла минимальен – он обозначен красным – оранжевым цветом.

Это объясняется тем, что гранулы инструментальной среды вибрирующие в плоскости X0Y имеют большие значения тангенциальной составляющей скорости соударения и большие пути скольжения.

При вибробразивной обработке с вращением крыльчатки при том же расположении траектории колебаний в координатах X0Y равномерность повышается. Средний съем составляет 4,4 , что на 32% выше, чем при отсутствии вращения. Отклонение значений съема от средней величины 3,9 , коэффициент вариации равен 88,6% (для абразива зернистости № 25). Частота вращения крыльчатки в численном эксперименте составляет продолжительность моделирования процесса упрочнения 42 периода, за которые деталь поворачивается против хода часовой стрелки на 360° вокруг центральной оси 0Y, проходящей через начало координат. При такой частоте вращения линейная скорость на кромке колеса составляет величину 25,3 см/с, что не оказывать существенного влияние на процесс формирования поверхностного слоя, так как эта скорость на порядок ниже скорости виброперемещений частиц инструментальной среды.

При увеличении амплитуды колебаний возрастает средний съем, но вместе с тем уменьшается равномерность (рис. 4).

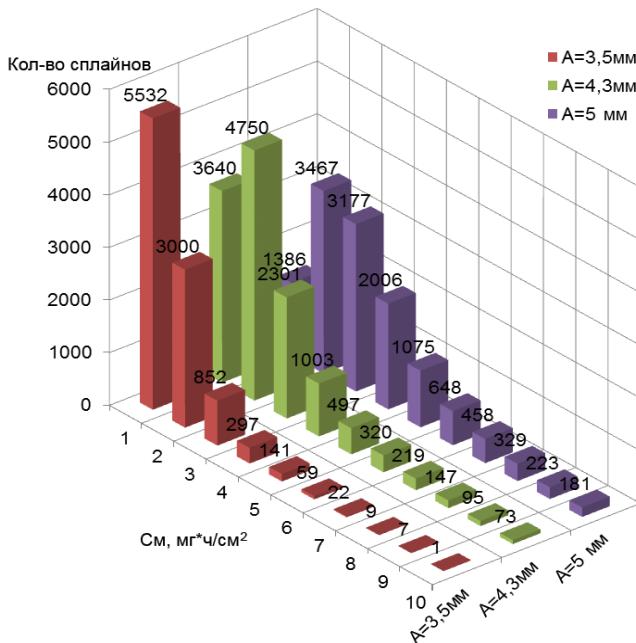


Рис. 4. Гистограммы сплайнового распределения съема металла при виброабразивной обработке в зависимости от амплитуды плоских колебаний

Производительность при трехмерном моделирования по технологии NVidiaCUDA повышается до 150-200 раз по сравнению с традиционным моделированием.

**УДК 621.787.4**

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ЗАКОНА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБОТКОЙ ППД ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

*Полов М.Е., Ельшейх Ахмад  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Применение статических методов ППД (например, выглаживание или накатывание), часто не рационально, из-за большой энергоемкости, в то время как аналогичное по эффективности силовое воздействие может быть получено при

реализации ударно-импульсной и статико-импульсной обработки, но с меньшими энергетическими затратами [1,2,7].

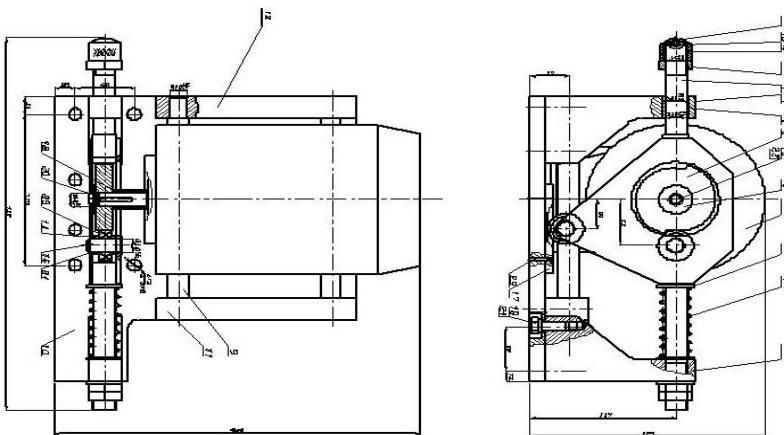


Рис. 1. Инструмент для ударно-импульсной обработки с пружинным приводом

На рис. 1 показано устройство для ударно-импульсной обработки, которое было сконструировано для токарно-винторезного станка 1К625.

Ударно-импульсный инструмент с пружинно-кулачковым механическим приводом состоит из корпуса 10, на раме которого смонтирован электродвигатель 28 постоянного тока 4П080В1, от которого вращательное движение передается профильному кулачку 5. С наружной поверхностью кулачка контактирует подшипник качения, укрепленный на подпружиненном штоке 1. Шток 1, к которому крепится сменный инструмент - боек 25, движется в направляющих.

В конструкции устройства вращательное движение вала электродвигателя за счет применения кулачка со ступенчатым профилем преобразуется в возвратно-поступательное импульсное движение штока. Вращающийся кулачок плавно отводит подпружиненный шток в сторону сжимаемой пружины. В момент времени, когда профиль кулачка ступенчато изменяется скатая пружина возвращает шток в исходное положение,

позволяя наносить удар шариковым индентором, закрепленным на его противоположном конце.

Использование в качестве привода стандартного электродвигателя постоянного тока 4П080В1 ГОСТ 183-73 и двухступенчатого кулачка позволяет инструменту наносить удары с частотой:

$$f = \omega_d \cdot n = 33,3 \div 66,6 \text{ Гц},$$

где:  $\omega_d = 16,6 \dots 33,3 \text{ об/сек}$  - частота вращения электродвигателя;  
 $n=2$  - количество ступеней на кулачке.

Амплитуда движения штока обусловлена конструкцией применяемого кулачка (высотой ступени) и расположением обрабатываемой поверхности. В представленной конструкции максимально возможная амплитуда составляет  $A=5 \text{ мм}$ .

В процессе обработки на рабочие поверхности наносят многочисленные удары подпружиненного инструмента - бойка. Регулируя усилие пружины и форму кулачка, можно подбирать оптимальную энергию ударного импульса инструмента - бойка при отделочно-упрочняющей обработке конкретных деталей. В результате обработки в поверхностном слое создаются сжимающие напряжения порядка  $600 \text{ МПа}$ , а на поверхности образуются регулярные микронеровности высотой до  $0,5 \dots 1,0 \text{ мм}$ , которые удаляются последующей отделочной обработкой. При упрочнении ударно-импульсным инструментом, упрочнённый слой формируется в результате наложения множества пластических отпечатков, получаемых под действием динамической нагрузки (рис.2).

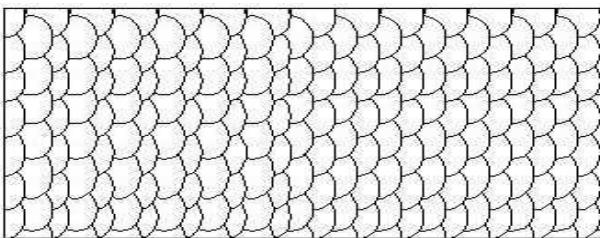


Рис. 2. Расположение отпечатков на поверхности при ударно-импульсной обработке инструментом с пружинным приводом

Степень, глубина и равномерность наклёпа поверхностного слоя зависят от размеров пластических отпечатков и от степени (коэффициента) их перекрытия. Следовательно, размер единичной вмятины  $\delta$ , скорость подачи заготовки относительно инструмента  $s$  и частота ударов  $f$  связаны между собой через коэффициент перекрытия:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta \cdot f \cdot 60}.$$

Технология упрочнения включает следующие этапы: предварительное статическое (при настройке) и последующее периодическое ударно-импульсное нагружение инструмента.

Энергия ударного механизма расходуется на разгон рабочего элемента инструмента до необходимой скорости или кинетической энергии; на внедрение рабочего элемента в упрочняемый материал при передаче силы через звено упругой связи; на упругую деформацию звена упругой связи в момент удара; на преодоление сил трения в опорах и зоне контакта соударемых тел [3,4,5,6].

Зная силу сжатия пружины  $P_{cp}$  и ход бойка  $X$ , можно с достаточной точностью определить потенциальную энергию  $E_n$  и энергию удара  $E_y$ .

$$E_n = P_{cp} \cdot X = E_y + E_{\text{от}}.$$

В зависимости от диаметра вдавливаемого бойка (шара) и твердости обрабатываемого материала оптимальное значение энергии удара составляет 5...80 Дж, для конструкционных сталей – 15...50 Дж.

Зависимость между диаметром отпечатка  $d$  и нагрузкой  $P$  на шар при его внедрении в упругой и пластической областях описывается уравнениями Герца и Мейера:

$$P = \frac{1}{3D \cdot \left( \frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} \cdot d^3; \quad (11)$$

$$P = a \cdot d^n,$$

где  $D$  - диаметр шара;  $E$ ,  $E_1$  - модуль упругости шара и обрабатываемого материала;  $\mu$ ,  $\mu_1$  - коэффициенты Пуассона шара и материала;  $a$ ,  $n$  - константы пластичности.

Глубина наклёпа  $h$  связана с силой деформирования  $P$  соотношением

$$h = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_m}},$$

где  $\sigma_m$  - предел текучести материала.

Для конструкционных сталей, с погрешностью не более  $\pm 10\%$ , справедливо соотношение  $\sigma_m = HB/3$ , поэтому

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot P}{HB}}, \quad h = 1,5 \cdot d.$$

Установлено, что качество обрабатываемых поверхностей деталей машин при пластическом деформировании зависит от ряда технологических факторов обработки, конструктивных параметров инструмента, а также физико-механических свойств материала.

Наличие взаимосвязи между условиями поверхностного пластического деформирования (ППД) с результатами обработки показывает, что геометрия и размеры деформирующих элементов, углы их установки относительно оси обрабатываемой детали и усилие деформирования являются определяющими при формировании контактной зоны. Обобщающим фактором контактной зоны может рассматриваться объем металла, вытесняемого деформирующим элементом, при его внедрении в деталь, а следовательно площадь пятна контакта и величина глубины внедрения.

Достоверность приведенных моделей была подтверждена экспериментальными исследованиями. Используя приведенные модели, варьируя параметрами управления, можно получить основные заданные показатели качества обрабатываемой детали в пределах технологических возможностей рассматриваемого метода ППД. Исследование динамики процесса ударно-импульсной обработки инструментом с пружинным приводом, раскрытие закономерностей протекания процесса для различных стадий работы устройства позволяет наиболее эффективно использовать технологические возможности данного процесса.

- 
1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник.- М.: Машиностроение, 1987.-328 с.
  2. Олейник Н.В., Кычин В.П., Луговской А.Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин.- Киев: Техника, 1984.-151 с.
  3. Нагаев Р.Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями.- М.: Наука, 1985.-200с.
  4. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара.- Л.: Машиностроение, 1976.- 324 с.
  5. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Т.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом.- М.: Машиностроение, 1985.-151 с.
  6. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твёрдых тел. Удар.- Киев: Наук. Думка, 1976.-314 с.
  7. Киричек А.В., Соловьёв Д.Л. Технология и режимы упрочнения статико-импульсной обработкой//Справочник. Инженерный журнал.- М.:2003. №2.- С. 17-19

## **УДК 621.92.048.6**

### **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРМЕТРОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

*Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Шведова А. С., Казаков Д. В.  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Постоянно растущие требования к выпускаемым деталям машин связаны с необходимостью повышения показателей качества и надежности, которые в значительной степени определяются эксплуатационными свойствами (ЭС). ЭС находятся в прямой связи с показателями качества поверхностного слоя, формирующимиися в процессе изготовления деталей. На этапах финишной обработки происходит окончательное формирование геометрических размеров, шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации, согласно необходимым требованиям.

Одним из универсальных и экономичных способов получения высоких показателей качества поверхности является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Применение методов ППД на финишных этапах обработки позволяет получить мелкозернистую структуру и целостность

волокон металла, минимальные высотные параметры шероховатости, благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое, что в свою очередь положительно сказывается на таких эксплуатационных свойствах, как: усталостная долговечность, износостойкость, контактная жесткость, коррозионная устойчивость.

Одним из наиболее производительных среди известных методов ППД является центробежно-ротационная обработка (ЦРО) в среде стальных шариков. Данный вид обработки отличается простотой оборудования, его малой металло- и энергоемкостью, а также большой номенклатурой обрабатываемых деталей сложной конфигурации и возможностью решения различных технологических задач.

Сущность метода центробежно-ротационной обработки состоит в том, что металлические шарики 3 и обрабатываемые детали 4 загружаются в рабочую камеру и приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что вся масса загрузки приобретает форму тора. Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры, состоящей из неподвижной цилиндрической вертикально расположенной обечайки 1 и примыкающего к ней врачающегося дна (ротора) 2, имеющего форму тарели (рис.1).

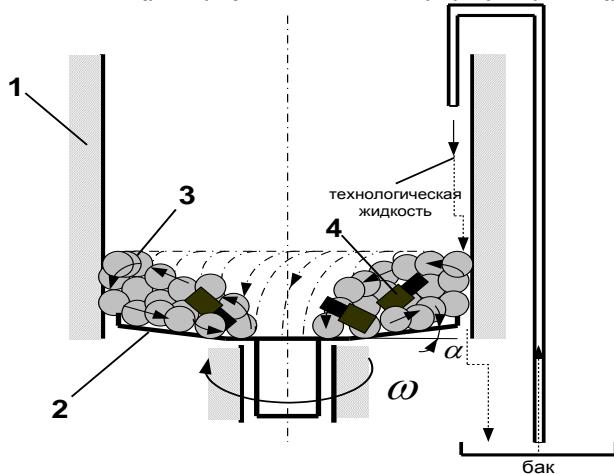


Рисунок 1 Схема центробежно-ротационной установки.

Анализ технологических процессов обработки деталей показал, что применение методов обработки ППД оказывает воздействие через повышение характеристик качества поверхностного слоя на износостойкость, контактную жесткость, коррозионную устойчивость, усталостную долговечность и другие эксплуатационные показатели. Для получения необходимых ЭС при изготовлении деталей необходимо обеспечивать надежность ТП. Под надежность ТП понимают - свойство ТП обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах.

Надежность ТП механической обработки является комплексным фактором, которое обеспечивается рациональным выбором оборудования, инструмента и оптимальных режимов обработки. Критериями, определяющими надежность ТП, являются:

- обеспечение требуемого уровня качества по контролируемому параметру;
- обеспечение стабильности его достижения.

В ходе теоретических исследований процесса ЦРО как объекта управления, определены параметры, характеризующие входные и выходные переменные процесса и параметры, характеризующие условия реализации технологического процесса.

С учётом влияния объёма загрузки рабочей камеры и объёма подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости уточнены зависимости для расчёта среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, глубины и степени упрочнения. При проведении теоретических исследований получены зависимости для расчета производительности и качества ЦРО:

Определение среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости при ЦРО:

$$R_{ayuc} = 0,006 \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot a \cdot b \cdot l_{eo}}{R^2}} \quad (1)$$

где  $h_{\max}$  – максимальная глубина внедрения шарика;  
 $a, b$  – полуоси эллипса контакта шарика с поверхностью детали;

$l_{ed}$  - единичная длина;

$R$  – радиус шарика.

$$h_{\max} = 2 \cdot k_u^{\frac{1}{2}} \cdot V_0 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_u}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_s}} \quad (2)$$

Где  $K_u$  - коэффициент, учитывающий влияние соседних шариков при ЦРО;

$V_0$  - скорость движения шариков;

$\alpha$  – угол встречи шарика с поверхностью детали при ударе;

$\rho_u$  - плотность материала шарика;

$k_s$  - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта.

$\sigma_s$  - предел текучести материала;

$c$  – коэффициент несущей способности контактной поверхности.

Определение глубины упрочненного слоя, непосредственно влияющей на многие эксплуатационные свойства, при ЦРО:

$$h_h = 3k \sqrt{\left( \frac{\pi}{2} \cdot (ctg \alpha - f) \cdot h_{\max} + b \right) \cdot \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}} \quad (3)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от степени наклена;

$f$  - коэффициент трения шарика о поверхность детали.

Зависимость для определения степени упрочнения при ЦРО:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\left( \left( \frac{\pi}{2} \cdot (ctg \alpha - f) \cdot h_{\max} \right) + b \right) \cdot \sqrt{R^2 - (R - \frac{h_{\max}}{4})^2}}}{R}$$

Технологический процесс должен обеспечивать заданные качество продукции и производительность труда, а также стабильность качества во времени, необходимом для выпуска продукции в требуемом объеме. Можно выделить ряд факторов, оказывающих влияние на ход операций и следовательно на качество производимой продукции. Управляющими факторами могут выступать:

1. Частота вращения ротора  $\omega$ .

Увеличение частоты вращения  $\omega$  приводит к увеличению шероховатости поверхности и параметров упрочнения. Однако, увеличение частоты вращения с одной стороны приводит к увеличению производительности обработки, а с другой – при неограниченном увеличении  $\omega$  происходит образование неустойчивого торOIDально-винтового потока абразивных гранул. Выбор частоты вращения  $\omega$  следует производить в зависимости от поставленной задачи обработки. Частоту вращения ротора  $\omega$  можно учесть при теоретических расчетах.

2. Объем подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости  $V_{СОЖ}$ . Уменьшение объема подаваемой СОЖ отрицательно сказывается на шероховатости поверхности.

Регулируя технологический процесс с помощью управляемых факторов, можно компенсировать влияние неуправляемых и трудноуправляемых факторов, добиться требуемого качества обрабатываемых деталей за счет повышения надежности технологического процесса, т.е. создать условия, при которых в течение заданного времени качество обрабатываемых деталей будет соответствовать предъявляемым к ним техническим требованиям.

Анализ технологического процесса, подобно управлению, можно выполнять на уровне процесса в целом либо на уровне отдельной технологической операции (технологической системы) [2].

Анализ проводят, используя следующие показатели точности:

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру)

$$K_T = \frac{\omega^P}{T} \quad (5)$$

где  $\omega^P$  - поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время;

$T$  - допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega^P = 6\sigma \quad (6)$$

где  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивают точность контролируемого параметра, если

$$K_T \leq K_{TO} \leq 1 \quad (7)$$

где  $K_{TO}$  - нормативное (предельное, технически обоснованное) значение  $K_T$ .

2. Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру)

$$K_\rho(\tau) = \frac{\omega^P(\tau)}{T} \quad (8)$$

где  $\omega^P(\tau)$  - поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени  $\tau$ .

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_{cm}(\tau) = \frac{\bar{\Delta}(\tau)}{T} \quad (9)$$

где  $\bar{\Delta}(\tau)$  - среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени  $\tau$ ,

$$\bar{\Delta}(\tau) = |\bar{y}(\tau) - y_0| \quad (10)$$

где  $\bar{y}(\tau)$  - среднее значение контролируемого параметра;  $y_0$  - значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение  $y_0$ , совпадает с номинальным значением параметра  $y_{\text{ном}}$ ).

4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_3(\tau) = 0,5 - K_{cm}(\tau) - 0,5K_\rho(\tau) \quad (11)$$

При контроле точности должно выполняться условие  
 $K_3(\tau) > 0$

От величины допуска на шероховатость обработанной поверхности зависит точность обработки. Это одна из основных причин выбора метода обработки. Одна из основных задач исследования – определение влияния величины допуска шероховатости обработанной поверхности при изменении основных технологических параметров на надежность технологического процесса ЦРО.

Согласно зависимости (12) значение коэффициента запаса точности (по контролируемому параметру) должно быть положительным. Одновременно согласно зависимости (1) мы можем определить значение среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, что дает возможность определить влияние поля рассеяния технологических режимов и величины допуска шероховатости обработанной поверхности на надежность ТП ЦРО.

Используя программу для расчетов MathCad удалось определить как в зависимости от величины допуска на шероховатость поверхности детали будет влиять на надежность изменение режимов обработки (частота вращения ротора, объем загрузки рабочей камеры, объем подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости). Допуск на шероховатость обработанной поверхности принимался равным от 0,01 мкм до 0,9 мкм с шагом варьирования 0,1 мкм.

На основе проведенного анализа, были рассчитаны коэффициенты смещения, мгновенного рассеивания и запаса точности, которые характеризуют надежность технологического процесса, затем в ходе теоретических расчетов были построены

зависимости влияния частоты вращения ротора и величины допуска на деталь на надежность ТП ЦРО. На рисунках 2-3 приведены полученные зависимости.

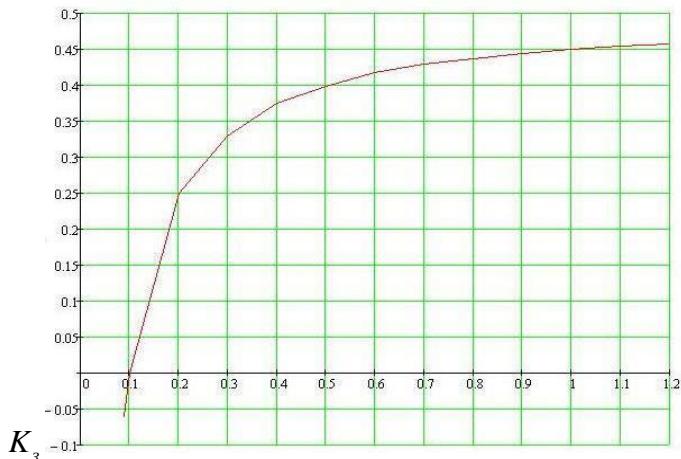


Рисунок 2 Зависимость коэффициента запаса точности от величины допуска на шероховатость обработанной поверхности при  $\omega=6$  Гц.

$K_3$

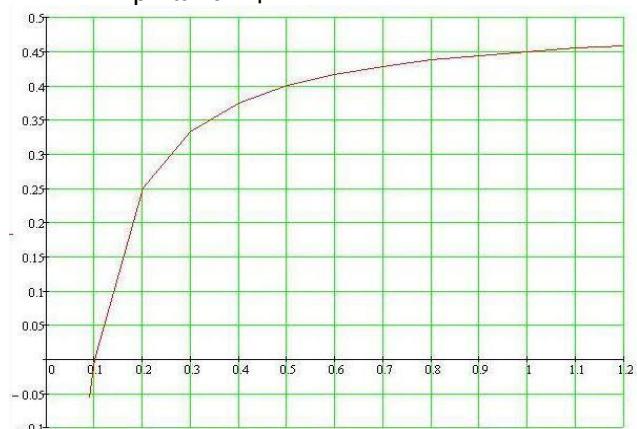


Рисунок 3 Зависимость коэффициента запаса точности от величины допуска на шероховатость обработанной поверхности при  $\omega=12$  Гц.

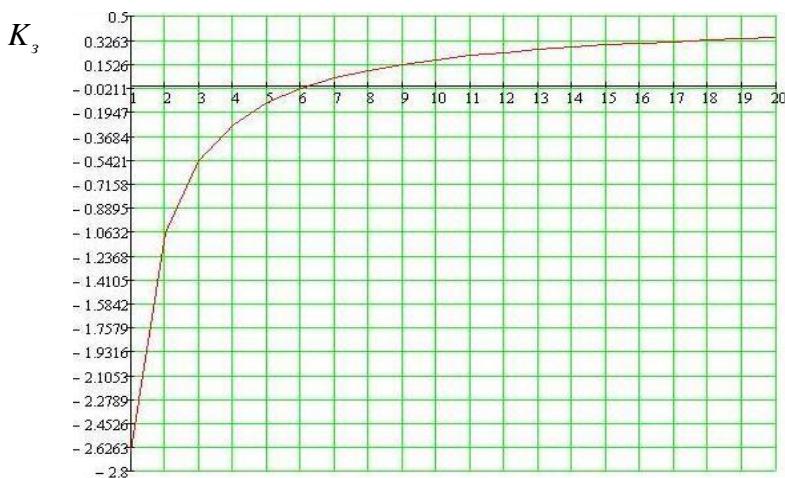


Рисунок 4 Зависимость коэффициента запаса точности от величины допуска на степень упрочнения поверхности при  $\omega=6$

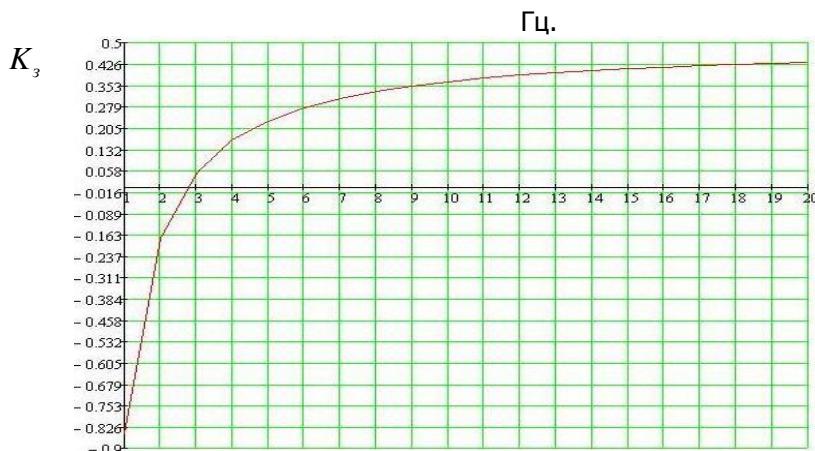


Рисунок 5 Зависимость коэффициента запаса точности от величины допуска на степень упрочнения поверхности при  $\omega=6$  Гц.

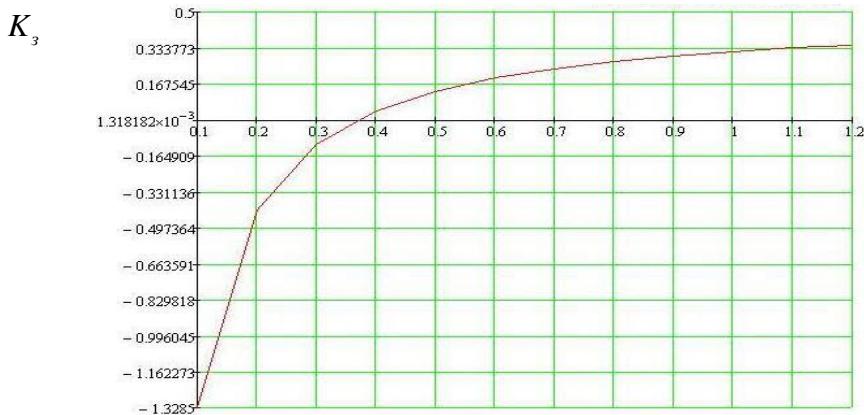


Рисунок 6 Зависимость коэффициента запаса точности от величины допуска на глубину упрочненного слоя при  $\omega=6$  Гц.

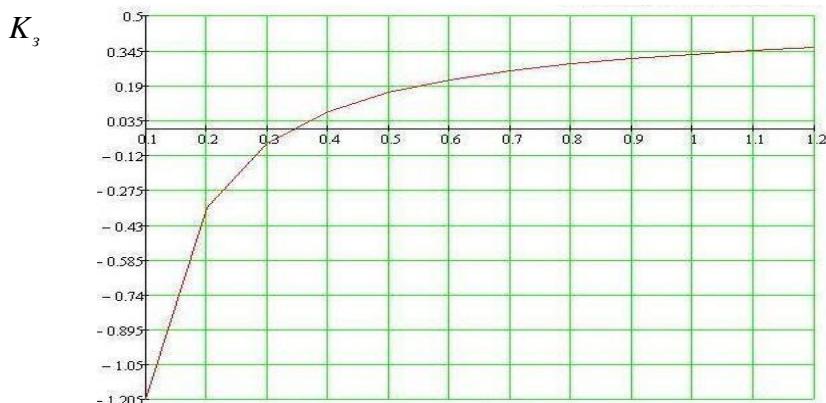


Рисунок 7 Зависимость коэффициента запаса точности от величины допуска на глубину упрочненного слоя при  $\omega=12$  Гц.

Как видно из графиков, коэффициент запаса точности КЗ при увеличении стремится к максимальному значению 0,5, что обеспечивает самую высокую степень надежности ТП.

При использовании программы MathCad для расчетов удалось определить как величина допуска на степень упрочнения поверхности детали Т будет влиять на надежность

ТП ЦРО в зависимости от различных технологических параметров (частота вращения ротора, объем загрузки рабочей камеры, объем подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости). Полученные зависимости представлены на рисунках 4-5.

Установлено, что с увеличением величины допуска Т надежность ТП повышается при изменении полей рассеяния значений технологических параметров.

Также при использовании программы MathCad для расчетов удалось определить как величина допуска на глубину упрочненного слоя детали Т будет влиять на надежность ТП ЦРО в зависимости от различных технологических параметров. Полученные зависимости представлены на рисунках 6-7.

Из представленных зависимостей видно, что между коэффициентом запаса точности и допуском Т существует прямая зависимость: при росте одного показателя растет другой. Самая высокая степень надежности ТП наблюдается при =1,2 мм.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что представленная методика позволяет получить стабильность качества ЦРО и выбрать оптимальные значения технологических режимов, которые позволяют надежно обеспечить требуемые характеристики поверхностного слоя обработанных деталей, и таким образом получить требуемые ЭС, даже при условиях определенных отклонениях этих режимов от необходимых значений.

**УДК 621.924.093**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

*Тихонов Ан. А., Тихонов А.А.  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Процесс скругления острых кромок, шлифования сложных поверхностей, подготовки поверхности под покрытие, снижение шероховатости поверхности обеспечивается методом струйной гидроабразивной обработки.

При исследовании основных технологических параметров обработки свободными абразивами одним из важнейших

является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия частиц абразива с поверхностью обрабатываемой детали.

Е. Ф. Непомнящий [1] получил зависимость для определения объема металла, удаленного за один удар абразивной частицы:

$$V = 15,5 \cdot R^3 \left( K_T \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \cdot \rho_q}{3 \cdot c \cdot \sigma_s \cdot \rho_{cm}}} \right)^{\frac{5}{2}} (ctg \alpha - f) \quad (1)$$

И зависимость съема металла за один удар абразивной частицы

$$q = 15,5 k_c \cdot R^3 \left( K_T \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \cdot \rho_q}{3 \cdot c \cdot \sigma_s \cdot \rho_{cm}}} \right)^{\frac{5}{2}} (ctg \alpha - f) \rho_o, \quad (2)$$

где  $\rho_o$  - плотность материала детали.

Общее количество взаимодействий на площади квадрата упаковки (в случае упаковки абразивных частиц на поверхности детали по квадрату, со стороной равной диаметру описанной окружности), приводящих к микрорезанию, можно определить следующим образом:

$$n_p = P_1 P_2 t \quad (3)$$

где  $P_1$  - геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за единицу времени воздействия массы абразивных частиц;

$P_2$  - вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию;

$t$  - время обработки.

В обычном случае, когда площадь поверхности детали больше квадрата упаковки, общее число взаимодействий, приводящих к микрорезанию:

$$N_p = n_p \frac{S_{\text{дет}}}{S_{\text{кв.уп.}}} , \quad (4)$$

где  $S_{\text{дет}}$  - площадь поверхности детали;

$S_{\text{кв.уп.}}$  - площадь квадрата упаковки.

Приняв  $S_{\text{кв.уп.}} = 4R^2$ , получим:

$$N_p = P_1 P_2 t \frac{S_{\text{дет}}}{4R^2} \quad (5)$$

Разрушение поверхностного слоя при обработке свободными абразивами происходит преимущественно путем микрорезания. Следовательно, при расчете съема металла достаточно учитывать только число взаимодействий  $N_p$ , приводящих к микрорезанию:

$$Q = N_p q$$

где  $Q$  - съем металла с поверхности детали.

Подставив значение  $N_p$  из (5) получим:

$$Q = P_1 P_2 t q \frac{S_{\text{дет}}}{4R^2} \quad (6)$$

Поскольку на поверхность детали воздействует направленный поток частиц, логично предположить, что появление случайных следов взаимодействия на поверхности детали подчиняется закону Пуассона.

Появление пятен контакта на детали подчиняется закону Пуассона. При этом вероятность появления  $k$  событий за время  $t$  определяется по формуле:

$$P_{(k)} = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (7)$$

где  $\lambda$  - интенсивность потока, т.е. среднее число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки.

Соответственно, зависимость для определения объема металла примет вид:

$$Q = P_2 \lambda t q \frac{S_{\text{dem}}}{4R^2} \quad (8)$$

Величина  $\lambda$  зависит от технологических параметров (давление воздуха, зернистость абразива) и может быть определена при экспериментальном моделировании.

В работе [2] предложена методика вывода зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости при обработке свободными абразивами и пользуясь этой методикой для ГАО получена зависимость:

$$Ra = 0.09 \sqrt{\frac{h_{\max} L_{ed}}{\lambda}} \quad (9)$$

где  $L_{ed}$  – единичная длина.

Экспериментальные исследования процесса гидроабразивной обработки проводились в условиях ОАО "Роствертол" на гидроабразивной установке Rosler WA140. Материалы образцов для экспериментальных исследований выбирали с учетом необходимости проверить универсальность теоретических моделей и возможности широкого применения результатов исследований для обработки деталей из машиностроительных материалов (сталь ХВГ, сталь 45, медь Моб, латунь Лс59, алюминий Д16, сталь 12x18н10Т). Использовали кварцевый песок с зернистостью 30-60.

На рисунках 1 и 2 приведены теоретические зависимости (кривые) и результаты экспериментальных исследований (точки) влияния расстояния от сопла до поверхности детали на съем металла и шероховатость поверхности.

Полученные экспериментальные данные отличаются от теоретических не более чем на 20%.

В результате экспериментов были определены значения интенсивности потока при разных сочетаниях режимов обработки. При помощи программы matcad получены эмпирические зависимости для расчета интенсивности потока при различных значениях технологического режима. Полученные зависимости представлены на рисунках 3, 4, 5, где точки это экспериментальные данные, а кривая эмпирические зависимости

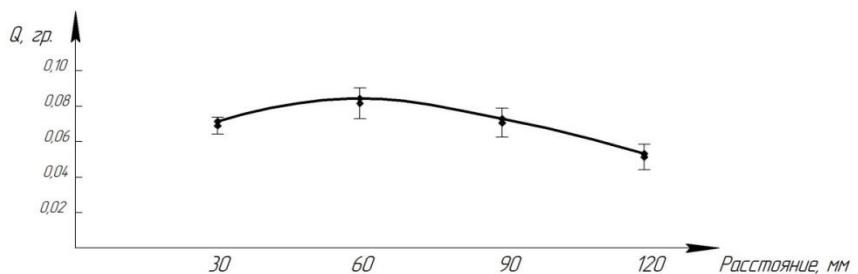


Рис. 1 Зависимость съема металла от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

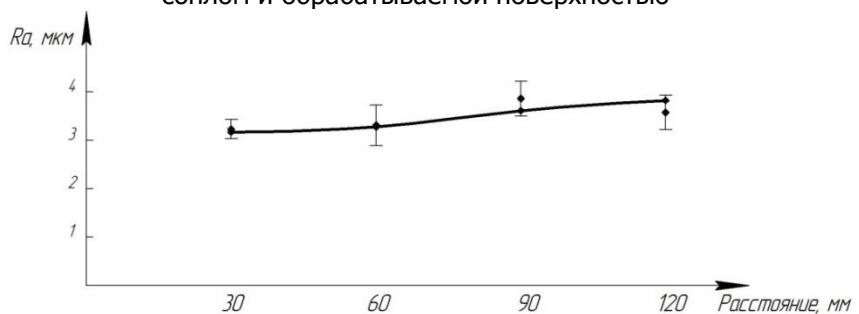


Рис. 2 Зависимость установившейся шероховатости поверхности от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

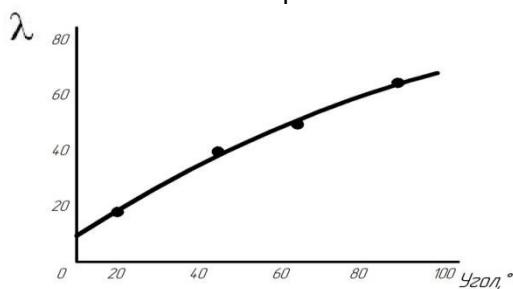


Рис. 3 Зависимость интенсивности потока от угла наклона потока к поверхности детали

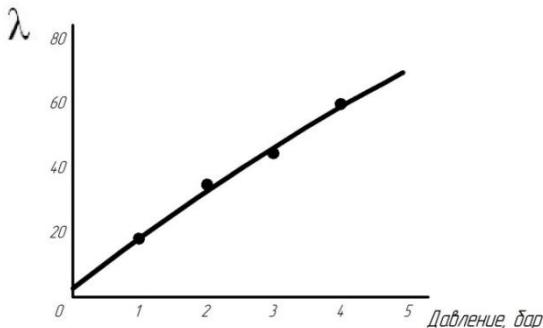


Рис. 4 Зависимость интенсивности потока от давления потока

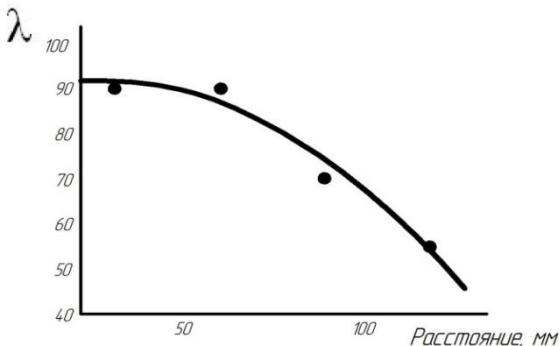


Рис. 5 Зависимость интенсивности потока от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

Полученные теоретические зависимости могут быть использованы для прогнозирования параметров шероховатости и съема металла с обработанной поверхности при проектировании технологических процессов ГАО.

1. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц.// Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.:Наука,1971.-С.190-200.

2. Тамаркин М. А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами г. Ростов-на-Дону - 1995 г.

**УДК 62-182.66:621.979.330.138.**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА  
СПОСОБОВ РАЗБОРКИ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ  
РЕМОНТЕ И УТИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ.**

*Бабичев А.П., Эссола Дьедонне., Пастухов Ф.А., Чава М.М.  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

При производстве, ремонте и утилизации техники различного назначения, в том числе сельскохозяйственной, авиационной и автомобильной, сборочно-разборочные и моечно-очистные операции составляют значительный объем трудозатрат. Установлено, что затраты труда на разборочно-сборочных операциях составляют около 40% от общей трудоёмкости ремонта автомобиля. Рациональная организация разборочных и моечно-очистных работ оказывает существенное влияние на качество и экономические показатели производства и ремонта техники [1].

В ходе разборки сопряжений следует избегать возможности потери прочности соединений и связей, так как это может приводить к нарушению герметичности в соединениях или вызывать динамические нагрузки, приводящие к поломке деталей. Нарушения посадки характеризуется увеличением зазоров в подвижных соединениях и уменьшением натяга в неподвижных соединениях. Изменения отклонения форм, ориентаций и взаимного расположения поверхностей отдельных деталей ведет к потере соосности, параллельности, перпендикулярности осей деталей относительно друг друга, изменению круглости, плоскостности и пр. а так же расстояния между деталями. Нарушение контакта сопряженных поверхностей характеризуется изменением площади их прилегания. Например, в двигателях при деформациях сопрягаемых плоскостей блока и головки, при износах клапанов и их гнезд в головке, нарушается герметичность соединений, при износах зубьев шестерен увеличиваются напряжения на отдельных участках поверхности, что ведет к ускорению процессов изнашивания или деформации деталей.

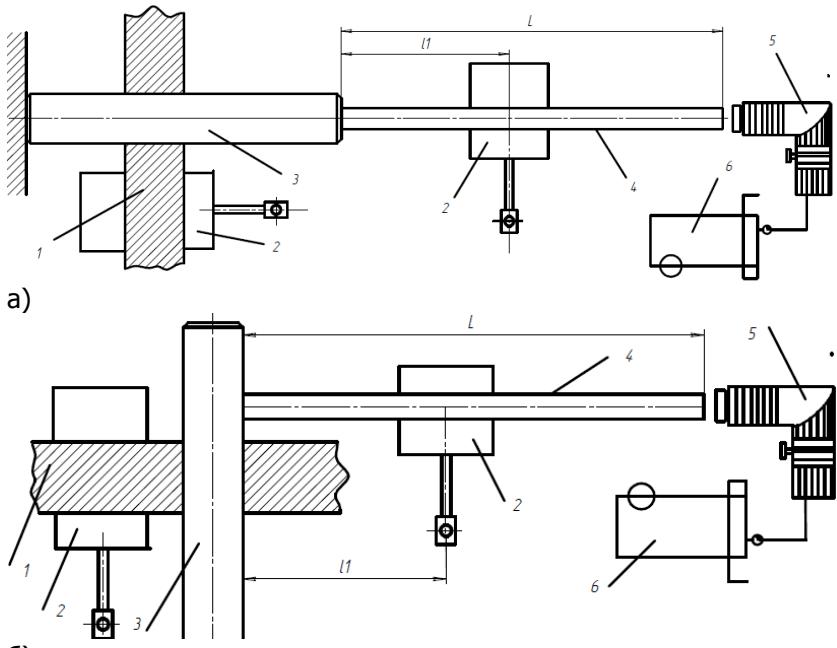


Рис. 1. Схема нагружения при разборке прессовых соединений с применением волновода: 1 – стальной лист толщины 5 мм с точными отверстиями; 2 – тиски; 3 – штифт; 4 – стержневой волновод; 5 – пневмоударник КМП 14; 6 – компрессор. а) нагружение параллельно оси штифта; б) нагружение перпендикулярно оси штифта.

Основным фактором осложняющим разборку резьбовых и прессовых соединений, по обоснованию [1, 2] являются, как правило, силы трения в зазоре, заметно возрастающие в ходе эксплуатации узлов из-за коррозии, загрязнений, заедания, полимеризации смазок, задиров и схватывания сопряженных поверхностей. Совершенствование технологии разборки необходимо также для снижения дефектов поверхности сопрягаемых деталей, их поломки, повреждения и пр.

Для подтверждения выше изложенного, выполнен ряд экспериментов по схеме указанной на рисунке 1. Глубина посадочного отверстия составляла 5 мм и отклонение

варьировали. Усилие контролировали с помощью ручного гидравлического пресса.

На рисунке 2 видно, что усилие разборки, а так же и сборки прессовых соединений можно снизить многократным повторением сборочно-разборочной операции без дополнительной обработки. Исходя из рисунка 5 следует, что чем больше натяг, тем больше требуемое усилие для выполнений отмеченных операций. При этом по мере повторения процессов сборка – разборка отмечается микрорезание и пластическая деформация в связи с наличием некоторого отклонения профиля, выступов и впадины профиля шероховатости поверхности. Указанное явление сопровождается уменьшением шероховатости поверхности деталей, увеличением микротвердости поверхностного слоя, постепенным снижением исходного натяга, ростом фактической площади контакта между элементами соединения и в конечном итоге снижением коэффициента трения сопрягаемых деталей которое объясняет отмеченные явления. Причем установлено, что на каждом номере сборочно-разборочной операции, прилагаемое усилие, необходимое для разборки меньше, чем усилие требуемое для сборки.

В работе [4] графически изображен характер скачкообразного изменения сборочно-разборочного усилия необходимого для выполнения соединения или разъединения элементов в течении всего процесса.

Наибольшее усилие распрессовки вала из отверстия Р, необходимое для сборки, а следовательно, и разборки соединения с натягом,

$$P = f \pi d l p \quad (1)$$

где  $f$  - коэффициент трения при запрессовке,  $d, l$  - соответственно номинальный диаметр и длина отверстия втулки, мм;  $p$  - напряжение сжатия на контактной поверхности, Па.

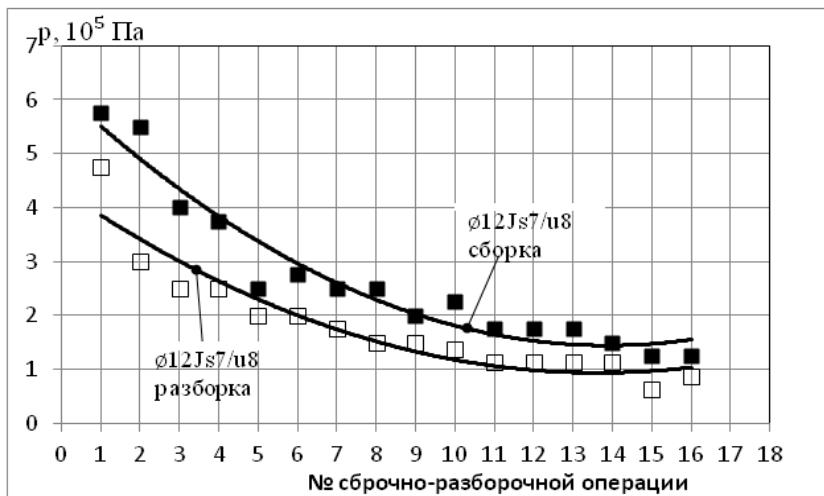


Рис. 2. Влияние повторения сбрасочно-разборочной операции на снижение необходимого усилия Р для выполнения указанного действия.

### Сравнение способов разборки соединения различными путями

Ранее было отмечено, что наложение низкочастотных колебаний  $f = f_{обр} \in [15, 50] \text{ Гц}$  на элементы соединения снижает усилие разборки. Отмеченное снижение носит ступенчатый (прерывистый) характер (рис. 3), влияние натяга, а так же эффективность разборки для различных схем нагружения. Отсюда следует, что увеличение натяга между валом и втулкой сопровождается повышением усилия необходимого для разборки соединения.

Наибольший эффект достигается при одновременном и непрерывном виброволновом воздействии. Это следует из работы [4] в которой установлено, что наложение на вал продольных колебаний приводит к его упругим продольным деформациям на величину амплитуды  $\xi$  и поперечным деформациям диаметра на  $\Delta d = \mu \xi$  (где  $\mu$  - коэффициент Пуассона).

Оценка влияния виброволнового нагружения на прочность соединения представляется усилием, необходимым для сдвига вала относительно кольца (втулки), в виде:

$$P_p = \tau S_H [1 - \Phi(t)] \quad (2)$$

где  $\tau$  - давление необходимое для относительного сдвига поверхностей;

$S_H$  - номинальная площадь контакта;  $\Phi(t)$  - интеграл вероятности.

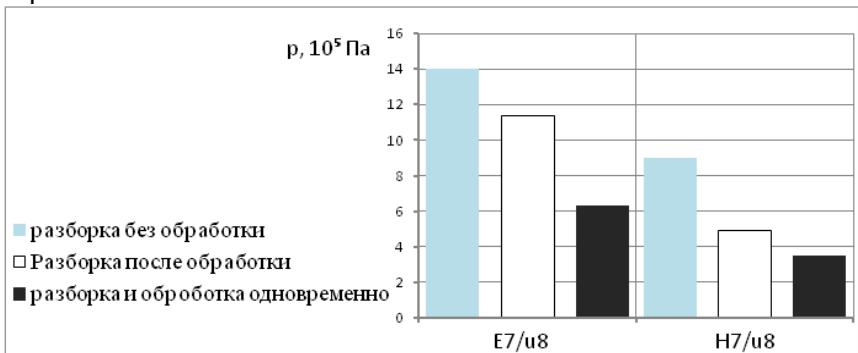


Рис. 3 . Зависимость усилий Р, необходимых для разборки прессовых соединений при различных сочетаниях виброволнового воздействия.

Анализ микрорельефа поверхности разобранных деталей показывает, что после виброволновой разборки микрорельеф деформируется в меньшей степени и лишь небольшая часть наиболее высоких неровностей подвергается смятию или срезу, а на внутренней поверхности втулки отсутствуют кольцевые полосы, характерные для обычной распрессовки.

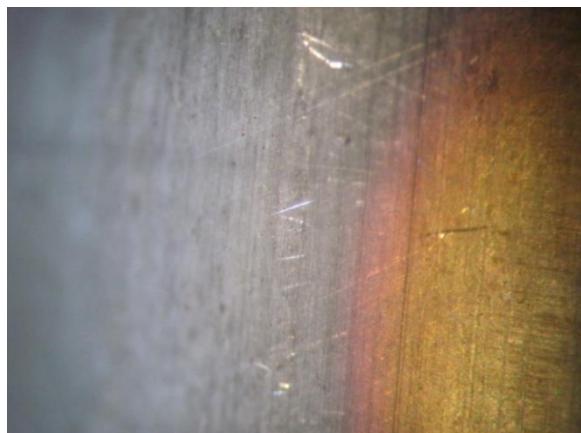
Это приводит к тому, что разборка осуществляется с переменным натягом в условиях дискретного и динамического взаимодействия поверхностей. Причем наложение на вал виброволнового нагружения благоприятно отражается как на показателе процесса разборки, так и на качестве поверхности соединения.

Наибольшие затруднения вызывает посадка с натягом тонкостенных колец подшипников, которые упруго деформируются и принимают форму вала в поперечном сечении,

копируя отклонения от круглости на беговой дорожке и ухудшая тем самым условия работы тел качения.

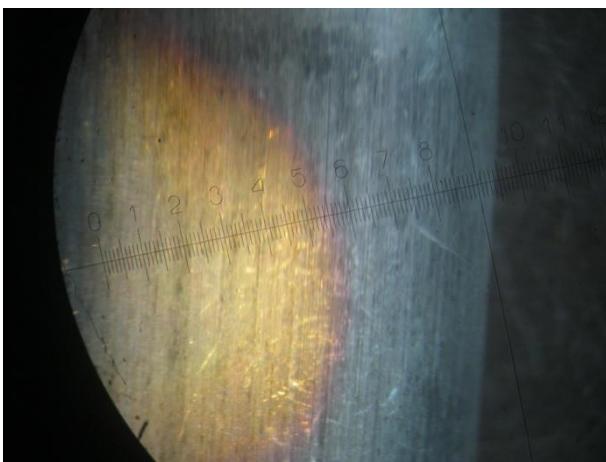
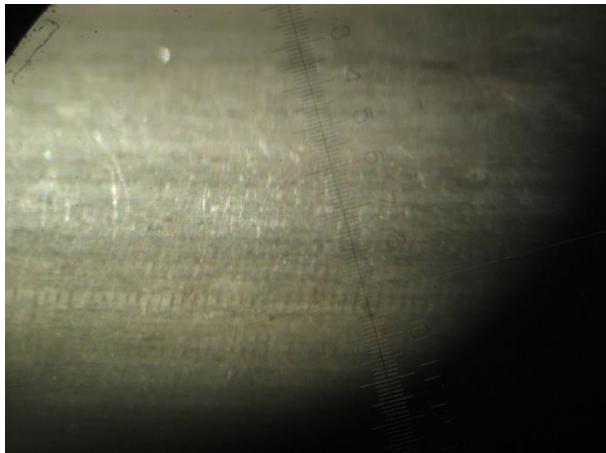


а)



б)

а) исходная поверхность (до сборки)      б) поверхность после  
разборки без обработки



в) поверхность после обработки ( $t_{обр}=60$  с.)

Рис. 4. Микроскопическое исследование поверхности вала.

При некотором значении натяга  $\delta$  с учетом амплитуд колебаний необходимое усилие для разборки при наложении волны  $P_p$  практически падает до нуля. Микронеровности поверхностей сопряжения хорошо сохраняются, и взаимодействие более высоких и развитых микрорельефов в сопряжении увеличивает фактическую площадь контакта и

способствует росту числа адгезионных связей, образование которых интенсифицируется вследствие разрушения окисных пленок и образования физического контакта поверхностей под воздействием виброволнового нагружения.

Снижение сопротивления пластическому деформированию и сил трения ведут к уменьшению усилий расспрессовки, но одновременно облегчают процесс микрорезания неровностями более твердой детали поверхности контратела.

Следствием этого является снижение фактического натяга в собранном соединении, что должно было бы привести к потере его прочности. Однако образование продуктов износа, заполняющих впадины микрорельефа стружкой, увеличивает площадь контакта деталей и повышает прочность соединений аналогично тому, как это имеет место при сборке соединений с абразивом.

**Заключение.** Многократное приложение усилия для повторной разборки ослабляет исходный натяг и упрочняет контактирующие поверхности разобранных деталей. Наложение нагрузок при смещениях микронеровностей приводит к исчерпанию запаса пластичности, и дальнейшее сообщение валу виброволновых колебаний приводит к разрушению зоны контакта что способствует облегчению разъединения соединения. При этом разборка упрощается за счет ослабления требуемых усилий, отмечается снижение царапин и улучшение параметра шероховатости и повышение микротвердости. Возможность реализации в зоне контакта эффекта микрорезания может быть успешно использована для исправления погрешностей формы поверхностей сопряжения.

---

1. Селиверстова О.В. Автоматизация технологических режимов ультразвуковой обработки при производстве и ремонте автотракторной техники: автореферат дис. канд. тех. Наук. – М: МАДИ(ГТУ), 2009. – 26 с.

2. Бабичев А.П., Эссола Д., Коваленко Е.Н., Коваль Н.С., Гончаров Б.А.

Применение механических колебаний (вибраций) в процессах разборки неподвижных разъемных соединений в условиях ремонта и утилизации изделий машиностроения // Вестник ДГТУ выпуск № 1, – 2012, – с.

3. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд. 2-ое, перераб. и доп. – Ростов – на – Дону: издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

4. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / Вологин М.Ф., Калашников В.В., Нерубай М.С., Штриков Б.Л. - М.: Машиностроение, 2002. – 264 с., ил. (серия «Библиотека технолога»).

**УДК 621.762**

**СИНТЕЗ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ АЛМАЗОВ  
И ПЛОТНЫХ ФОРМ BN**

*Витязь П.А., Сенють В.Т., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г.,  
Клименко С.А.*

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, ГНПО  
«Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, Институт  
металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РА,Н г.  
Москва, Россия, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.  
Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

Известно, что физические и механические свойства поликристаллических материалов инструментального назначения наряду с химическим и фазовым составом определяется их зеренной структурой [1]. По сравнению с микроструктурными сверхтвердыми материалами (СТМ) на основе алмазов и кубического нитрида бора (КНБ) поликристаллы, полученные на основе нанопорошков алмазов и плотных форм нитрида бора (BN), либо на основе композиций, включающих нано-, субмикро- и микропорошки СТМ, будут обладать улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Поэтому разработка методов получения таких материалов сегодня является актуальной задачей.

**Материалы, методики и аппаратура исследования.**

В качестве основы сверхтвердых композитов на основе КНБ служил микропорошок КНБ с размерами частиц 1- 5 мкм, синтезированный в системе Mg-B-N, а также субмикропорошок КНБ фракции 0,3 - 0,5 мкм, прошедший обработку в планетарной мельнице с целью создания в немnanoструктуры. Оба вида порошков были получены в ОИМ НАН Беларуси (г. Минск). Вюрцитный нитрид бора (ВНБ) производства Запорожского абразивного комбината получен взрывным методом и характеризуется размерами частиц 0,5 - 5 мкм. Частицы порошка ВНБ имеют поликристаллическое строение и состоят из субзерен размером около 0,1 – 0,3 мкм с высокой степенью дефектности кристаллической решетки. Смешивание композиционных шихт

производили в аттиторе в среде этилового спирта в режиме активации в течение 15 мин.

Для синтеза наноструктурных алмазных материалов использовали порошки алмазосодержащей шихты детонационного синтеза с содержанием неалмазных форм углерода до 50 мас. % и порошки наноалмаза с размерами 2-10 нм, очищенные от неалмазных форм углерода производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск). Перед спеканием в условиях высоких статических давлений осуществляли предварительный отжиг алмазосодержащей шихты и порошков наноалмаза при нормальном давлении в восстановительной атмосфере аммиака в диапазоне температур 500 – 900 °C в течение 1 -3 часов, а также в вакууме при температуре 900°C в течение 1 часа. Спекание композитов проводили в аппарате высокого давления «наковальня с лункой» при давлениях 2,5- 7,5 ГPa в диапазоне температур 1300 - 2300°C в течение 10-60 с.

Для количественного описания структуры поверхности разрушения полученных наноструктурных материалов использовали оригинальную методику мультифрактальной параметризации структур [2].

**Экспериментальная часть. Материалы на основе плотных форм BN.** Качество материала на основе плотных форм BN в значительной степени определяется качеством исходных компонентов, в первую очередь, используемого порошка КНБ. Обычно для получения композиционных материалов используют микропорошки кубического нитрида бора дробленые из крупнозернистых порошков или спеков до размера зерен менее 40 мкм, а затем классифицируют на фракции. В настоящей работе получение микро- и субмикропорошков КНБ осуществляли непосредственно в процессе синтеза из графитоподобного нитрида бора.

Установлено, что образцы на основе материала, полученного из смеси микро- и субмикропорошков КНБ, спеченные в диапазоне давлений 4,5 - 5,5 ГPa обладают достаточно высокой пористостью и микротвердостью на уровне 20 - 25 ГPa. Увеличение давления спекания до 7,7 ГPa приводит к росту относительной плотности материала до 99,5 % и, соответственно, к увеличению его микротвердости до 40 ГPa.

Далее исследовали спекаемость наноматериала на основе вюрцитного BN. Порошок вюрцитного BN перед спеканием модифицировали алюминием, газофазным способом [3]. Алюминий в процессе высокотемпературного отжига частично переходит вnanoструктурные бориды и нитриды алюминия, а также оксид алюминия переменного состава, что дополнительно способствуют дисперсному упрочнению и измельчению структуры синтезируемых поликристаллов. Кроме того, в процессе отжига в защитной (восстановительной) атмосфере осуществляется активация порошка вюрцитного BN и происходит рафинирование поверхности его частиц. На основе рентгеноструктурных исследований установлено, что после спекания BNB частично сохраняется, а частично переходит в KNB. Структура материала, полученного на основе вюрцитного BN после модификации алюминием показана на рис.1.

Третью группу образцов на основе BN получали с использованием шихты на основе порошков вюрцитной и кубической фаз BN, в которую дополнительно вводили алюминий. В этом случае в результате спекания под давлением происходит формирование многофазного продукта, в котором содержится до 90 мас. % KNB, а также тугоплавкие соединения AlB<sub>2</sub> и AlN. Композиционный материал имеет высокодисперсную структуру, в которой нанокристаллиты тугоплавких соединений цементируют более крупные частицы кубического BN. В данном случае был получен материал с наиболее высокими микротвердостью (45 ГПа) и трещиностойкостью до 15 МПа·м<sup>1/2</sup>.

Условия и режимы процессов синтеза материалов на основе nanoструктурных алмазов. В работе рассматривались также варианты синтеза nanoструктурных алмазных материалов путем компактирования наночастиц с графитоподобным углеродом на поверхности и очищенных от неалмазных форм углерода [4, 5].

По первому варианту, в условиях высоких давлений и температур спекали частицы наноалмаза, поверхность которых покрыта тонким слоем неалмазного углерода толщиной около 1 нм. Покрытие формировали путем отжига очищенных наноалмазов в вакууме при 10-3 мм рт. ст. и температуре 900 оС. Полученный композиционный порошок алмаз - графитоподобный углерод, находился в нанодисперсном

состоянии и представлял собой метастабильную систему, характеризующуюся избыточной поверхностной энергией.

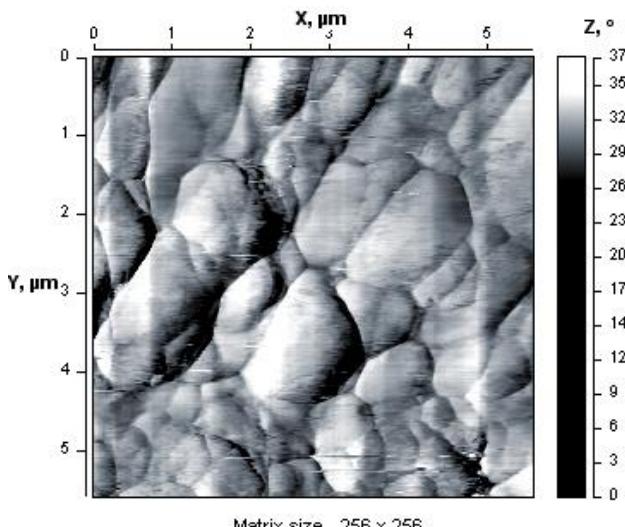


Рис. 1. ACM – изображение микроструктуры спеченного поликристаллического материала, полученного из вюрцитного BN, модифицированного алюминием

Синтез алмазного наноструктурного поликристаллического материала в этом случае происходит при достаточно низких давлениях и температурах путем, подобным катализитическому, когда наночастицы углерода можно рассматривать в качестве катализаторов синтеза алмаза при сочетании механизмов роста кристаллов и поликристаллов. В результате образуются две подсистемы частиц – наnano- и микроструктурном уровне.

При термобарической обработке композиционного порошка алмаз - графитоподобный углерод в тонких поверхностных слоях на основе неалмазного (графитоподобного) углерода происходит его превращение в алмаз (алмазоподобный углерод), при этом исходные агрегаты из частиц nanoалмаза объединяются в более крупные частицы с

сохранением первичной структуры. Рентгеноструктурным анализом и просвечивающей электронной микроскопией установлено, что частицы обладают субструктурой, характерной для исходных нанопорошков алмаза. В материале, полученном при температуре 1300 - 1500 °С, размер алмазных кристаллитов несколько увеличен по сравнению с размером исходных частиц наноалмаза и составляет 20 -30 нм, размеры поликристаллических частиц составляют 3 – 5 мкм. С ростом температуры до 2300 °С и давления до 7 ГПа отмечается образование поликристаллических областей размерами 10 мкм при величине алмазных кристаллитов порядка 100 - 150 нм.

По второму варианту, после химической очистки, спекали очищенные нанопорошки алмаза в условиях высоких давлений и температур, как в области стабильности алмаза, так и в области его метастабильности. Создание поликристаллического алмазного материала в этом случае идет преимущественно по диффузионному механизму. Так же, как и в первом варианте, частицы имеют поликристаллическое строение, при этом размеры монокристальных областей составляют 100 - 150 нм, а размеры поликристаллических образований достигают 0,5 – 1,5 мкм.

Была выполнена мультифрактальная параметризация полученных изображений структур поликристаллов на основе КНБ и модифицированных и не модифицированных наноалмазов. В результате установлен диапазон  $r$ ,  $T$  режимов, соответствующих квазиупругой и упруго-пластичной деформации материалов в зависимости от их составов, определен порог перколяции для каждого вида структур и проведена оптимизация условий синтеза наноматериалов.

### **Исследования поддержаны грантом РФФИ 14-08-90011 и БРФФИ Т14Р-198.**

---

1. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение /П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильющенко, В.Т. Сенють, А.И. Комаров, А.П. Корженевский, А.В. Ивахник / Под общ. ред. П.А.Витязя. - Минск: Бел. наука, 2013.- 381 с.

2. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов - Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. - 116 с.

3. Изучение структуры ПСТМ на основе ультрадисперсного порошка КНБ после модификации W и Ti / В.Т. Сенють [и др.] // V Международная

конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 26-29 ноября 2013 г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2013.-С. 560-562.

4. Витязь П.А., Сенють В.Т., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г., Клименко С.А. Синтез алмазныхnanoструктурных материалов на основе наноалмазов // Докл. НАН Беларуси.- 2012. – Т.56.- № 6.- С.87-91.

5. Витязь П.А., Хейфец М.Л., Сенють В.Т., Колмаков А.Г. Синтез поликристаллических алмазных материалов на основе детонационных наноалмазов // Известия ВУЗов. Сер. Химия и химическая технология. - 2013.-Т 56.- №7.- С.105 - 108.

## УДК 621.01

### ПЛАСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ – ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЁЖНОСТИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ

*Дудников А.А., Канивец А.В., Келемеш А.А.*

Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава,  
Украина

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) материала деталей в сочетании с вибрационными колебаниями обрабатывающего инструмента представляет собой один из эффективных методов упрочнения [1]. Поскольку многие детали машин работают в особо тяжёлых условиях (ударные нагрузки, высокие температуры, агрессивная абразивная среда и др.), то большое внимание уделяется прианию поверхностному слою необходимых физико-механических свойств, обеспечивающих повышение их износостойкости, а, следовательно, и ресурса машин.

Упрочнением деталей поверхностным пластическим деформированием в их поверхностных слоях происходят структурные изменения, способствующие повышению твёрдости и прочности обрабатываемого материала. При этом образуются благоприятные остаточные напряжения сжатия, которые способствуют снижению шероховатости обрабатываемых поверхностей и повышению качественных показателей обработки материала [2].

Следует отметить, что спектр использования ППД для разработки технологических процессов восстановления ресурса деталей очень обширен и многогранен. Рассмотрим

применяемые некоторые технологии восстановления деталей, которые можно считать энергоресурсосберегающими, поскольку при их применении нет потерь металла в стружку. Деталь восстанавливает работоспособность, не теряя при этом своей массы. При этом ресурс её возрастает, зачастую превышая ресурс новой детали.

Особенно это относится к деталям, требующим заострения режущей рабочей кромки (диски копачей свёклуборочных машин, диски сошников зерновых сеялок, плужные лемехи, культиваторные лапы и т.д.) [3].

Технологии, основанные на поверхностном пластическом деформировании с применением вибрационных колебаний обрабатывающего инструмента, выгодно отличаются от используемых для восстановления деталей сокращением количества таких технологических операций, как отжиг, нагрев, закалка, отпуск и т.д., требующих больших дополнительных затрат. При этом отпадает необходимость поддержания температуры детали при её обработке в нагретом состоянии.

Подобранные режимы ППД с использованием виброупрочнения (скорость и время обработки, амплитуда и частота обрабатывающего инструмента, возмущающая сила вибровозбудителя) обеспечивают повышение твёрдости и степени уплотнения материала обрабатываемой поверхности, а также износстойкости рабочих поверхностей указанных деталей. Большинство таких деталей изготавливается из легированных сталей (65Г, Л-53 и др.), имеющих высокую стоимость. Такие детали целесообразно восстанавливать, сведя до минимума потери дорогостоящего металла.

Лезвие рабочего органа перечисленных выше деталей имеет форму клина с углом заточки  $\alpha$  и шириной фаски  $/$  (рис. 1). В процессе эксплуатации остриё лезвия изнашивается более интенсивно по сравнению с другими поверхностями, приобретая закруглённую форму с радиусом  $r$  (рис. 1, б).

В процессе ремонта рабочего органа восстанавливают остриё лезвия механической обработкой (точение, шлифование) (рис. 1, в). Из схемы (рис. 1) видно, что количество металла, изношенного в процессе эксплуатации  $ADE$ , значительно меньше количества металла рабочего органа, потерянного при заточке ( $BCDE$ ).

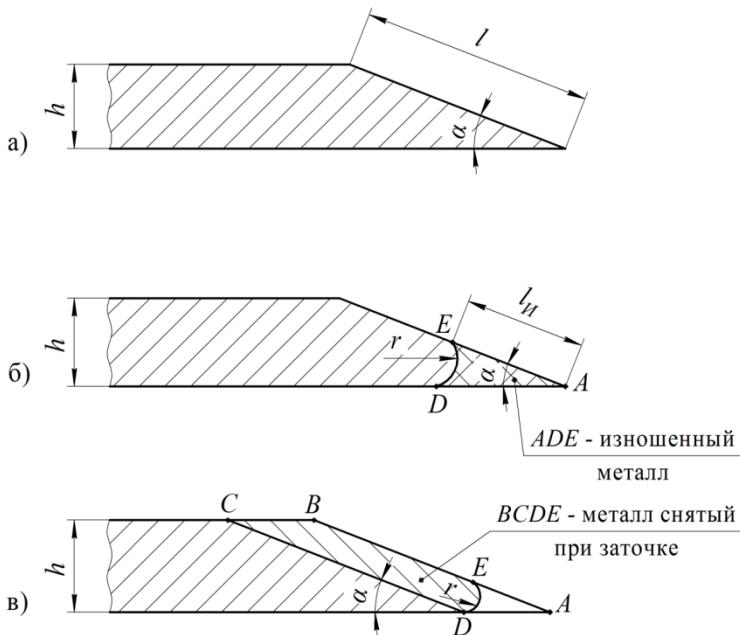


Рис. 1. Схема лезвия рабочего органа: а) новое лезвие; б) изношенное лезвие; в) изменение лезвия при заточке

Площадь (слой) металла, удалённого при заточке, будет равна:

$$S_3 = 2r \cdot l - r(l_H - \frac{1}{2}\pi r). \quad (1)$$

Площадь металла, потерянного при износе лезвия, определяется по зависимости:

$$S_H = r(l_H - \frac{1}{2}\pi r), \quad (2)$$

где  $l_H$  – длина изношенной части фаски.

Поскольку величины  $l$  и  $l_H$  при практических замерах определить с большой точностью достаточно трудно, то

определим их через угол заточки лезвия  $\alpha$ , являющийся более стабильной величиной:

$$l = \frac{h}{\sin \alpha}; \quad l_H = 2r \cdot ctg \alpha, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина рабочего органа.

Решая совместно уравнения (1) и (2) с уравнением (3) получаем:

$$S_3 = 2r^2 \left[ \frac{h}{r \cdot \sin \alpha} - \left( ctg \alpha - \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (4)$$

$$S_H = 2r^2 \left( ctg \alpha - \frac{\pi}{4} \right). \quad (5)$$

Относительные потери металла при заточке по отношению к потерям в процессе изнашивания лезвия составят:

$$G_o = \frac{S_3}{S_H}. \quad (6)$$

Подставляя значения  $S_3$  и  $S_H$  из уравнений (4) и (5) в выражение (6), определяем после соответствующих преобразований относительные потери металла:

$$G_o = \frac{h}{r(\cos \alpha - \frac{\pi}{4} \sin \alpha)} - 1. \quad (7)$$

Из данного выражения следует, что относительные потери металла при заточке лезвия рабочего органа прямо пропорциональны его толщине за зоной лезвия и обратно пропорциональны радиусу износа лезвия.

Практика показывает, что диски сошников за весь срок службы подвергаются заточке от трёх до пяти раз, что вызывает уменьшения диаметра диска на 30...50 мм. При этом диск теряет в своей массе 270...290 г металла, из них 30...35 г при износе, а остальное – при заточке [4].

Если изношенные диски не затачивать, а восстанавливать поверхностным пластическим деформированием с

вибрационным упрочнением их лезвий, то срок службы этих деталей будет значительно больше.

Данные эксплуатационных испытаний показали, что скорость изнашивания дисков сошников зерновой сеялки по диаметру и затупление их лезвий, восстановленных приваркой сегментов из стали 45 с автоматической наплавкой сортайтом и упрочнённых вибрационным деформированием соответственной в 1,75 и 2,0 раза меньше, чем у новых дисков из стали 65Г.

Повышение износостойкости дисков сошников, восстановленных по разработанной нами технологии с использованием их вибрационного деформирования, можно объяснить упрочнением поверхности лезвия при вибрационном нагружении, которая имеет более мелкозернистую структуру и повышенную микротвёрдость. Это способствует снижению величины износа обрабатываемой поверхности и, следовательно, повышению износостойкости дисков сошников зерновых сеялок.

Сопоставительные исследования эксплуатационной стойкости опорных втулок распределительных валов двигателей ЯМЗ-236/238 показали, что разработанный нами метод их восстановления, вибрационным деформированием обеспечивает снижение скорости изнашивания наружной и внутренней поверхности бронзовых втулок в 1,50...1,58 раза по сравнению с износом втулок, восстановленных по существующей технологии.

Установлено, что коэффициент технического использования двигателей с бронзовыми опорными втулками, восстановленными по разработанной технологии, имеет значение на уровне 0,965...0,982 [5].

---

#### 1. Бабичев

А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

2. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

3. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

4. Канивец А.В. Повышение долговечности деталей машин пластическим деформированием / А.А. Дудников, А.И. Беловод, В.В. Дудник, А.В. Канивец. – Луцк: ЛНТУ, 2001. – Вып. 32. – С. 128-131.

5. Келемеш А.А. Характер износа бронзовых втулок и способы их восстановления / А.А. Келемеш // Вибрации в технике и технологиях. – 2012. – №3(67). – С. 77-79.

**УДК 621.1.9.048**

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ**

*Пасюта А.Г.*

ПГАА, г. Полтава, Украина

Надежность и долговечность деталей во многих случаях зависят от качества, прочности и структурно-напряженного состояния материала их поверхностных слоев. В практике промышленного и ремонтного производства применяются целый ряд способов воздействия на состояние и свойства материала деталей машин, получивших название технологических методов поверхностного упрочнения. В основе многих из них лежит пластическое деформирование металла относительно тонких поверхностных объемов детали при сохранении неизменной их сердцевины.

Характер изменения физико-механических свойств по глубине материала детали после поверхностной обработки или упрочнения позволяет оценить их влияние на формирование окончательных свойств деталей [1].

В процессе эксплуатации машин поверхностный слой, их деталей зачастую получает новые структуру, фазовый и химический состав по сравнению с сердцевиной, в котором возникают остаточные напряжения. В силу этого к поверхностному слою предъявляются более высокие требования, чем к глубинным слоям деталей [2].

Одним из эффективных метод упрочнения поверхностного слоя является метод поверхностного пластического деформирования (ППД) с использованием механических колебаний обрабатывающего инструмента или обрабатываемой детали. Поскольку данный метод обработки является наиболее общим случаем вибрационного воздействия, то представляется важным установление вида и характера взаимосвязей между технологическими и конструктивными параметрами и их влияние на показатели качества поверхности слоя [3].

Конструктивными параметрами являются размеры и геометрическая форма деталей и рабочего инструмента, а

технологическими – параметры, оказывающие существенное влияние на характер протекания процесса и его результаты.

Конструктивными параметрами вибрационной обработки (рис. 1) являются вибровозбудитель и технологическое оборудование реализующее процесс обработки.

Для осуществления технологического процесса деформирования при восстановлении детали использовали вибровозбудитель механических колебаний с дебалансным регулирующим механизмом, позволяющим получать возмущающую силу в диапазоне 9,4-24,5кН, обеспечивающей необходимую энергию удара.

Исследованиями установлено, что оптимальными технологическими параметрами вибровозбудителя при восстановлении лап культиваторов марки КПС-4 являются: амплитуда колебаний обрабатывающего инструмента 0,5мм, частота колебаний  $1400\text{мин}^{-1}$ , время упрочнения 20с.

Использовались лапы типоразмера 3 с шириной захвата мм, толщиной металла мм, а также типоразмера 5 ( мм, мм).

ГОСТ 23.2.164-87 «Лапы и стойки культиваторов» предусматривает следующие значения углов лап: - угол крошения носовой части; - угол раствора; - угол крошения крыльев лапы, обеспечивающий необходимое рыхление почвы без оборота пласта.

Вибрационная установка (рис.2) позволяет осуществлять вибрационное упрочнение режущей кромки культиваторных лап с указанными технологическими параметрами.

На плате (9) крепится вибровозбудитель (10) с дебалансным механизмом, а к нижней ее части – зажимное устройство (11) для крепления обрабатывающего инструмента (13). Между четырёх направляющих (12) перемещается вибрационный узел. Направляющие прикреплены к стойкам (14), которые крепятся к двум опорным плитам, установленным на деревянных брусьях (21).

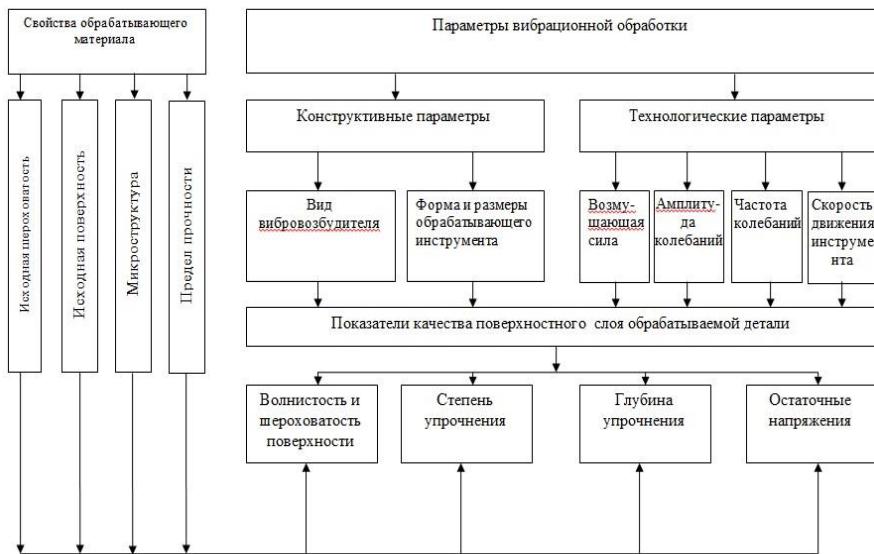


Рис. 1. Параметры вибрационной обработки

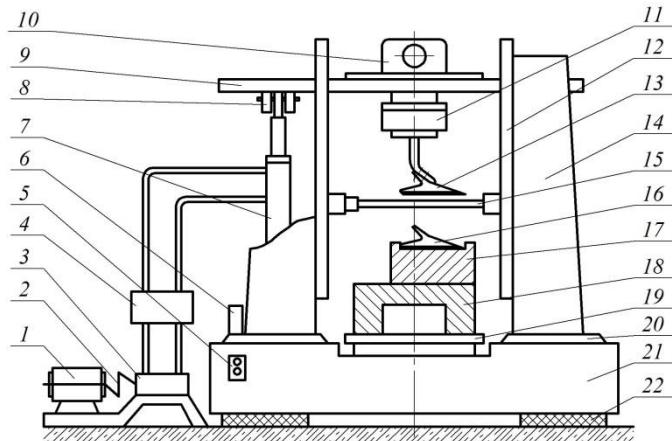


Рис. 2. Схема вибрационной установки:

1- электродвигатель; 2 – муфта; 3 – гидронасос; 4 – распределитель; 5 – пускател; 6 – бачёк; 7 – гидроцилиндр; 8 – резиновые амортизаторы; 9 – плита вибровозбудителя; 10 –

вибровозбудитель; 11 – зажимное устройство; 12 – направляющая; 13 – рабочий инструмент; 14 – стойка; 15 – стяжка; 16 – матрица; 17 – деталь; 18 – основание; 19 – плита; 20 – опорная плита; 21 – брус; 22 - амортизатор

Гидравлическим насосом (3), соединённым с электродвигателем (1), масло распределит (4) по шлангам подается в гидроцилиндры ЦС-100 (7), обеспечивая передвижение вибрационного узла с обрабатывающим инструментом навстречу обрабатываемой детали.

Изменение скорости перемещения инструмента осуществляется вариатором привода с клиноременной передачей от электродвигателя (1) до гидронасоса (3), обеспечивая необходимую энергию удара обрабатывающего инструмента с обрабатываемой поверхностью лапы.

Энергия удара является одним из основных параметров, определяющих величину пластической деформации.

При ППД энергия ударов, как правило, расходуется на упругопластическую деформацию и на процесс сухого трения инструмента в зоне пятна контакта с обрабатываемой поверхностью. При этом в очаге деформации образуется наиболее благоприятная для данных условий пролонгированная форма ударного импульса. Энергия удара, определяемая скоростью удара и массою рабочего инструмента, с учетом его формы и размеров определяет оптимальную амплитуду колебаний в очаге деформации [4].

Частота ударов регулирует скважность импульсов и кратность деформирующего воздействия. Скважность определяется отношением периода следования импульсов к их длительности. Она связывает длительность ударных импульсов (колебаний) с частотой колебаний (ударов) и является важной характеристикой импульсных систем (вибрационной установки), реализующих процесс упрочнения.

Скорость движения обрабатывающего инструмента вместе с частотой его колебаний и геометрическими параметрами площади контакта регулирует кратность динамического нагружения. Для повышения КПД технологического процесса необходимо производить обработку с максимально возможной частотой, обеспечивающей необходимую энергию ударов.

Рассмотренные параметры вибрационной обработки, как единая система, регулирующая показатели качества поверхности слоя, предполагают необходимость их регулирования для обеспечения эффективности технологического процесса упрочнения при восстановлении (изготовлении) деталей сельскохозяйственных машин [5].

Геометрия упрочненной поверхности в основном определяется геометрией отпечатка и в меньшей степени их перекрытием. Для получения низкой шероховатости и волнистости необходимо производить формирование отпечатков необходимой глубины с большим перекрытием. Увеличение глубины отпечатков, как правило, повышает волнистость обработанной поверхности. Поэтому для её снижения следует уменьшать перекрытие отпечатков, тем самым, увеличивал шероховатость.

- 
1. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов/ Ю.И.Бабей, Б.И.Бутаков, В.Г.Сысоев. К.: Наукова думка, 1995. -253с.
  2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин/ А.Г.Суслов. – М.: Машиностроение, 200. – 320с.
  3. Киричек А.В. Повышение эффективности ППД статико-импульсным нагружением очага деформации/А.В. Киричек, Д.Л.Соловьев// Фундаментальные и прикладные проблемы технолгии машиностроения. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 268-271.
  4. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии/ А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д; Издательский центр ДГТУ, 2008. -694с.
  5. Дудников А.А. Проектування технологічних процесів сервісних підприємств/ А.А.Дудников, П.В.Писаренко, О.І.Біловод, І.А.Дудников, О.П.Ківшик. –Вінниця: Наукова книга, 2011. - 400с.

**УДК 621.9-079**

## **МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ**

*Зацепилин А.Н.  
АТИ ДГТУ, г. Азов, Россия*

Как известно, в ходе токарной обработки закалённых тонкостенных деталей возникает необходимость исправления некруглости их поверхностей.

Рассмотрим три направления технологических приемов, обеспечивающих получение высокого качества изделий при значительном снижении трудоемкости финишной обработки.

1. Получение заготовок максимально приближенных к конфигурации детали, причем таким образом, чтобы требования к точности и чистоте поверхности были выполнены для 90-95% размеров и поверхностей готовой детали.

Так, например, основной корпус швейной машины «Ямато» на ОАО АОМЗ был получен методом литья в оболочковые формы с отклонениями размеров  $0,6+0,8$  мм вместо указанных в ГОСТе при таких габаритах  $3+4$  мм.

Заготовки, полученные горячей штамповкой, имели конфигурацию готовых деталей с отклонениями  $0,2+0,3$  мм вместо  $0,6+0,8$  мм по ГОСТ.

Заготовки для петлевителей были получены холодной объемной штамповкой с отклонениями размеров от готовых деталей в  $0.02+0.03$  мм.

Такой подход к получению заготовок резко повышает эффективность применения виброобработки для выполнения отделочных операций, а за счет получения равномерных минимальных припусков под механообработку существенно уменьшает влияние технологической наследственности.

## 2. Применение внешних принудительных колебаний при резании в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях по отношению к детали.

Большой объем исследований по резанию с вибрациями был проведен проблемно-отраслевой лаборатории МВТУ им. Баумана под руководством д.т.н. Подураева В.Н. Были получены положительные результаты влияния низкочастотных колебаний на качество поверхностного слоя; снижение шероховатости поверхности в 2+3 раза; уменьшение величины деформированного слоя; сил резания и влияния технологической наследственности.

Однако при операциях тонкого точения, характеризующимися повышенными скоростями резания наиболее эффективно применение ультразвуковых колебаний с частотой 22+44 кГц в осевом направлении, т.е. изменением величины подачи через адаптивную систему управления и вибратор.

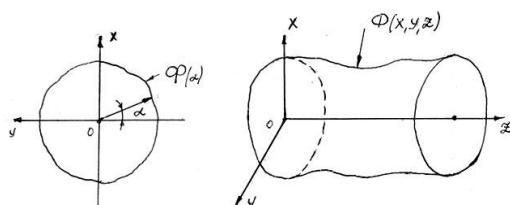
Так, например, при расточке отверстий в детали 21.00.275/АЯ изделия швейная машина «Ямато», имеющих вариации диаметра 0,1 мм под хонингование был применен метод устранения указанных погрешностей путем варьирования амплитуды ультразвуковых колебаний, возбуждаемых в зоне резания с помощью магнитно-стрикционного преобразователя в направлении подачи, что позволило за один проход с помощью программируемой модуляции уменьшить некруглость отверстий до 0,001 мм.

3. Применение обработки деталей на станках с ЧПУ с помощью управляющих программ, учитывающих вибрационные процессы, динамику и устойчивость системы станок-инструмент-деталь.

Движение инструмента в процессе резания происходит не по заданным УП статическим траекториям, а имеет хаотический характер в пределах некоторого фазового пространства и представляет собой эволюцию некоторой фазовой траектории, поведение которой описывается системой дифференциальных уравнений.

Переход к геометрической трактовке дифференциальных уравнений упрощает исследование динамических явлений в системе резания. Новый подход к исследованию динамики станочных систем представлен в работах д.т.н. Кабалдина и заключается в представлении её как эволюцию некой траектории в обобщённом фазовом пространстве.

Для рассмотрения вопроса эффективности управления эксплуатационными характеристиками изделия путем обработки резанием с вибрациями достаточно рассмотреть закономерности формирования геометрических параметров обрабатываемой детали в продольном и поперечном сечении.



В продольном сечении точность линейных размеров и формы, микрорельеф поверхности характеризуются функцией  $\Phi(x,y,z)$ . В поперечном сечении погрешности формы зависят от угловых координат детали и характеризуется функцией  $\Phi(a)$ . Для упрощения записи принимаем  $a = x$ .

Раскладывая функцию профиля  $\Phi(x)$  в ряд Фурье по  $x$  получим:

$$\Phi(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} f_i(t), \quad \text{где}$$

$$f_i(t) = a_i \cos i\pi x + b_i \sin i\pi x;$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \Phi(x) dx; \quad a_i = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \Phi(x) \cdot \cos i\pi x dx;$$

$$b_i = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \Phi(x) \cdot \sin i\pi x dx;$$

где  $T$  – период оборота детали.

Таким образом, получаем разложение функции точности профиля на различные гармонические составляющие, которые включают все известные характеристики точности. Например, точность линейных размеров определяется величиной коэффициента  $a_0$ , точность формы зависит от коэффициентов  $a_1, a_2, \dots, a_n$  и  $b_1, b_2, \dots, b_n$ . При точении на функцию профиля можно влиять путем изменения режимов резания и координат инструмента по отношению к базам станка в том числе за счет наложения внешних вибраций.

Координаты: скорости подачи –  $u_s$ ; скорости резания –  $u_v$ ; положения инструмента по отношению к базам станка –  $u_t$  – образуют вектор управлений  $u = (u_x, u_y, u_z)$ . Кроме вектора управления на функцию профиля влияет множество факторов, среди которых, можно выделить: отжимающую составляющую  $x_p$ , температуру в зоне контакта вершины резца и детали  $x_\theta$ , износ инструмента  $x_h$ . Следовательно, функция профиля определяется следующей функциональной зависимостью  $\Phi(x,y,z) = f(u_s, u_v, u_t, u_p, u_\theta, u_h)$ .

Одним из возможных вариантов устранения некруглости

связан с использованием адаптивных систем управления путем варьирования скорости подачи. Эти методы используются на основе применения принципа адаптивного управления процессами обработки на станках, разработанного школой Ю.М. Соломенцева. Однако можно показать, что в этом случае исправляются погрешности, распределенные по оси отверстия, но не погрешности, регулярно повторяющиеся по периметру движения точки контакта инструмента с заготовкой.

Пусть скорость резания при расточке отверстия остается величиной постоянной, тогда время движения инструмента в течении одного оборота есть также величина постоянная равная

$$S_p = \int_{t=0}^T V_s(t) dt \quad (1),$$

Т. Вычислим величину подачи на оборот:

где  $S_p$  – величина подачи на оборот,

$V_s(t)$  – управляемая величина скорости подачи.

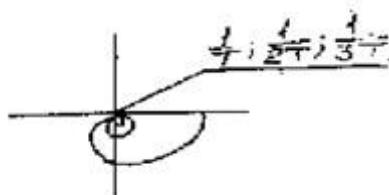
Тогда в изображениях по Лапласу в операторной форме передаточная функция, связывающая скорость подачи с величиной подачи на оборот определяется:

$$S_p(p) = V_s(p) \cdot \frac{1}{p} (1 - e^{-Tp}) \quad (2), \text{ где } p \text{ – оператор Лапласа.}$$

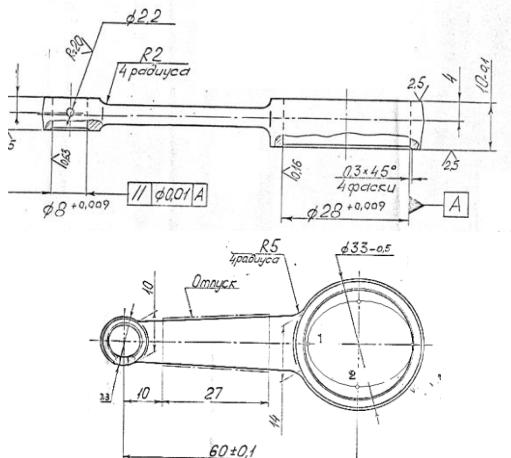
Изучая частотные свойства преобразования скорости подачи в величину подачи на оборот, не трудно убедится в том, что на

частоте равной  $\frac{1}{T}$  и кратных частотах амплитудно-фазо-частотная характеристика соответствующая передаточной функции (2) обращается в ноль. Графически это видно из годографа:

$$W(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega}$$



Следовательно, именно на частотах, которые соответствуют регулярно распределенным неровностям по периметру обработки исправление невозможно. Физически это объясняется следующими особенностями:



Пусть в точке 1 величина припуска в 2 раза меньше чем в точке 2, тогда для обеспечения неизменных упругих деформаций инструмента величина подачи в точке 2 будет в 2 раза меньше, чем в точке 1 (предполагается, что пропорционально величине подачи изменяется сила резания). Следовательно, после обработки в точке 1 в точке 2 инструмент обработает лишь половину детали. В этом смысл увеличения амплитуды колебаний и скорости подачи до бесконечности при обработке отверстий, имеющих большую длину. Таким образом, устранение некруглости таким методом полностью принципиально невозможно.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать при растачивании отверстия наложение дополнительных вибраций, например, ультразвуковой частоты, на процесс обработки резанием. Известно, что возбуждение в зоне резания дополнительных вибраций приводит к снижению сил резания, причем снижение сил зависит от амплитуды колебаний. В связи с этим предлагается новый метод устранения

указанного выше класса погрешностей (некруглости) с помощью варьирования амплитуды ультразвуковых колебаний, возбуждаемых в зоне резания с помощью магнитно-стрикционного преобразователя. Для управления амплитудой колебания путем варьирования мощностью возбуждения магнитно-стрикционного преобразователя используется априорная информация о варьировании припусков отверстия, которая определяется с помощью электронной контактной измерительной системы имеющей погрешность измерений 0,005 мм. Установлено, что, несмотря на сложность распределения остаточных деформаций, после термообработки, они обладают достаточно регулярными свойствами. Это объясняется тем, что закономерности температурных деформаций, прежде всего, связаны с геометрическими особенностями заготовки, которые практически не варьируются. В связи с этим, закон вариации амплитуды информации может быть задан априорно.

Проведенные исследования показали, что с помощью программируемой модуляции амплитуды колебаний за один проход удается уменьшить некруглость растачиваемого отверстия в десять раз, т.е. снизить разброс размеров с 0,1 до 0,01 мм.

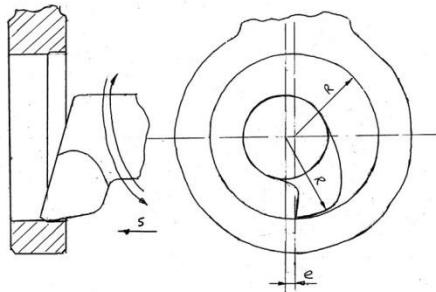
Сам факт существенного влияния вибраций на процесс говорит о том, что вибрации эффективно управляют качеством и эксплуатационными свойствами изделия.

При резании с вибрациями большое значение имеет кинематика движения вершины инструмента и характер пластических деформаций в зоне резания.

Процесс пластической деформации срезаемого слоя определяется деформациями сдвига и смятия. Причем при резании с положительным передним углом над передней плоскостью резца образуется зона растягивающих напряжений, а между обрабатываемой поверхностью и задней плоскостью резца образуется зона уплотнения. Интенсивность образования зоны уплотнения значительно повышается при увеличении частоты и амплитуды вибраций.

Большое влияние на характеристики поверхностного слоя имеет процесс образования поля сжатия напряжений при чистовом точении с ультразвуковыми колебаниями.

Так, например, при расточке отверстий  $\varnothing 28^{+0,009}$  в детали «шатун» 21.00.275/ая изделия швейной машины «Ямато» с ультразвуковыми колебаниями был применен расточной резец с положительным передним углом и задней поверхностью, выполненной по окружности равной растачиваемому отверстию со смещением  $e$ .



Путем варьирования амплитуды ультразвуковых продольно-крутильных колебаний вдоль оси детали, возбуждаемых в зоне резания с помощью магнитостриктора в направлении подачи удалось не только уменьшить некруглость отверстия с 0,1 до 0,001 мм, но и получить в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения.

Полученное упрочнение рабочей поверхности отверстия способствовало повышению ее чистоты на один класс после хонингования по сравнению с обработкой обычным точением перед хонингованием.

Повышение качества поверхности и ее твердости увеличило ресурс работы детали на 20%. Учитывая, что деталь работает в сопряжении с коленчатым валом со скоростью 8000 об/мин, полученный эффект также способствовал увеличению ресурса работы швейной машины.

Таким образом, применение вибраций при резании позволяет повысить эксплуатационные характеристики деталей подобно обработке специальными упрочняющими операциями, т.е. совместить процессы формообразования детали и упрочнения методом поверхностно-пластических деформаций.

---

1. В.Н. Подураев. Обработка резанием с вибрациями. –М.: «Машиностроение», 1970, 350с.

2. Ю.Г. Кобалдин и др. Исследование детерминированного хаоса в динамике процессов механообработки методом реконструкции аттрактора. «Вестник машиностроения» 2003 №1 с 50.

3. В.В. Юркевич. К вопросу точности токарной обработки. «Вестник машиностроения» 2004 №2 с 46

**УДК 621.9.048.6: 621.822.8**

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА РАДИУС КРОМКИ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ**

*Бабичев А.П., Гутета Кабета Вейесса, Пастухов Ф.А., Чаава М.М.  
ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

Механические колебания (многие виды которых часто называют вибрациями) и волновые процессы широко представлены в физике и вибрационной технологии (ВиТ). В частности рабочие процессы ВиТ тесно связаны с такими общими понятиями как свободные и вынужденные колебания и их параметры механика вибрационного воздействия на различные среды и взаимодействие среды с элементами вибрационных машин (станков), резонанс и автоколебания, устойчивые и неустойчивые колебательные системы, консервативные и диссипативные системы, нелинейные колебания механических систем, вибропикиющий слой сыпучих материалов и др.

В основе исследований многих процессов вибрационная обработка (ВиО) лежат закономерности движения и взаимодействия частицы обрабатывающей среды с обрабатываемой деталью идеализируемой в виде материальной точки[2, с.7].

Отделочно - зачистная обработка (ОЗО) объединяет группу методов безразмерной обработки деталей преследующих своей целью: удаление заусенцев, облоя и грата; скругление острых кромок, повышение качества поверхности на операциях шлифования и полирования; декоративную отделку поверхности; подготовку поверхности под покрытия; отчистку от загрязнений, окалины, коррозии, остатков формовочной смеси и т.п. [1, с.15].

При удалении заусенцев кромки детали должны скругляться в пределах установленного радиуса. Шероховатость

поверхности после удаления заусенцев также не должна превышать установленной величины.

По способу воздействия на деталь при обработке все методы ОЗО могут быть классифицированы на механические, химико-механические, электрохимические и физические[1,с.15].

Наиболее приемлемой для удаления облоя при вибрационной обработке является его толщина, которая не должна превышать 0,5-0,6мм. Превышение этой величины создает серьезные трудности в выполнении указанной операции или совсем исключает возможность 100%- удаления облоя [1, с.23].

Анализ технологических процессов машиностроительного производства показывает, что операции ОЗО составляют до 10-20% общей трудоемкости изготовления деталей, а количество деталей, подвергаемых ОЗО, составляет 85-95% от общего количества изготавливаемых деталей. [1,с.15]. ОЗО выполняется на различных стадиях технологических маршрутов обработки деталей в механообрабатывающем, кузнечно - прессовом и металлургическом производствах.

Операции ОЗО выполняются на различных стадиях технологических процессов изготовления деталей с применением различных видов оборудования и инструмента.

Для осуществления ОЗО в мировой практике разработан относительно большой арсенал методов, использующих абразивные инструменты и среды, гибкие металлические инструменты, лезвийный инструмент, методы поверхностного пластического деформирования, ультразвуковую обработку, химические и электрохимические методы, термо-окислительный и др.

Для деталей из пластмасс наиболее эффективно происходит удаление облоя толщиной 0,3-0,5 мм. Превышение этой величины вызывает значительное увеличение продолжительности обработки, что, в свою очередь, может привести к чрезмерному округлению кромок и искажению геометрических размеров обрабатываемой детали. В большинстве случаев максимально допустимой является толщина облоя не более 0,5 мм.

Удаление облоя указанной (или близкой по величине) толщины возможно только при использовании грубых режимов

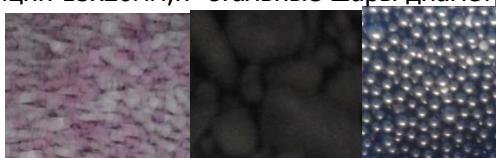
обработки и частиц рабочей среды крупной грануляции. Указанные условия обработки могут быть приемлемы лишь для обработки сравнительно грубых, с достаточно прочными элементами конструкции (ребра, и т.п.) деталей[1,с.24].

Экспериментальные исследования проводились на вибрационном станке УВГ-4Х10, с объемом рабочей камеры 10дм<sup>3</sup>; загрузка рабочей камеры средой составляла 0,75 объем рабочей камеры. Диапазон изменений амплитуд вибрационного воздействия состоял 0-5мм. Схема конструкции вибрационного станка УВГ-4Х10 показана на рис.1.



Рис.1. Вибрационный станок УВГ-4 x 10

В качестве рабочей среды применялись абразивные призматические гранулы ПТ 15Х15, Бой абразивных кругов грануляции 15x20мм, и стальные шары диаметр 7мм (Рис.2.)



а) ПТ 15 x 15    б) бой абразивных кругов    в) стальные шары

Рис.2. Рабочие среды

### 3. Методы и средства контроля

В процессе обработки заполнение рабочей камеры составляет 2/3 её объема рабочими средами. За тем подготовленные виды образцов роликовых подшипников помещены в рабочую камеру и обработаны соответственно в

течение 20, 40, 60 и 90 минут. После каждого периода обработки радиусы кромки были измерены с помощью двойного Микроскопа МИС-11(Рис.3). Результаты измерений зарегистрированы в табл. 1,2, 3 и 4 и на рис 4.А, Б, В и Г. Анализируя результаты, были сделаны следующие выводы.



Рис.3. Микроскоп МИС-11

Таблица 1.

Результаты экспериментов влияния времени обработки на изменение радиуса кромок (абразивные гранулы ПТ 15Х15, амплитуда колебаний, А =1...1.5мм)

Значение исходное радиуса кромки R, мкм	Время обработки (мин.)			
	20	40	60	90
R <sub>1</sub> = 55.65	58.10	71.42	73.84	74.7
R <sub>2</sub> = 40.36	42.20	72.34	91.52	110.5
R <sub>3</sub> = 51.25	56.47	74.15	89.73	123.2
R <sub>4</sub> = 31.33	36.54	55.84	83.43	91.34

$R_5 = 69.73$	71.14	73.63	81.38	88.04
---------------	-------	-------	-------	-------

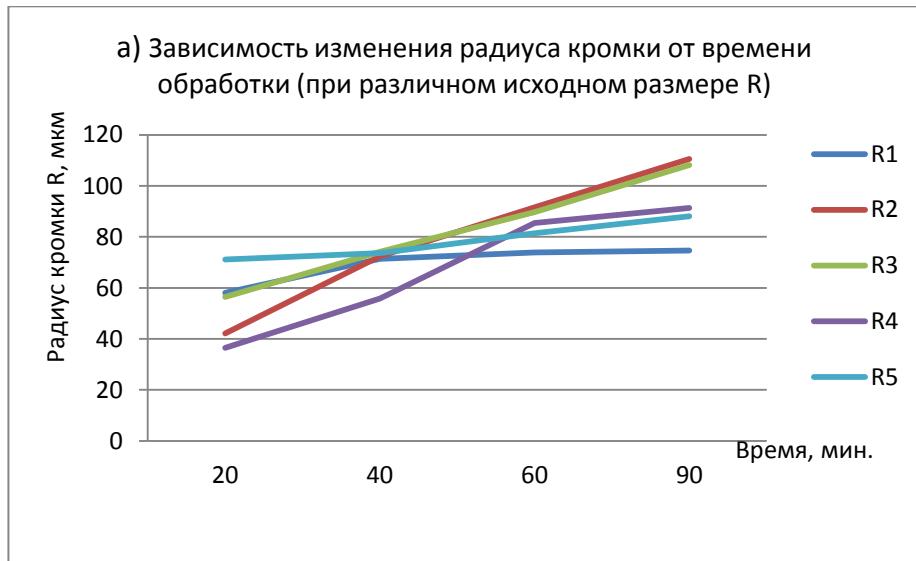


Рис.4. А) Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, Рабочая среда абразивные гранулы- ПТ 15 х 15мм, амплитуда колебаний,  $A=1\dots1,5$ мм

Таблица 2.

Изменение радиуса кромок от времени обработки  $t$ ;  
рабочая среда грануляции 15х20мм

Значение исходное радиуса кромки $R$ , мкм	Время обработки(мин.)		
	30	60	90
$R_1 = 56.66$	61.54	64.34	102.0
$R_2 = 40.86$	55.8	65.41	83.45
$R_3 = 41.25$	49.7	89.4	102.6
$R_4 = 45.35$	56.43	75.13	85.4
$R_5 = 58.73$	63.45	74.10	101.56

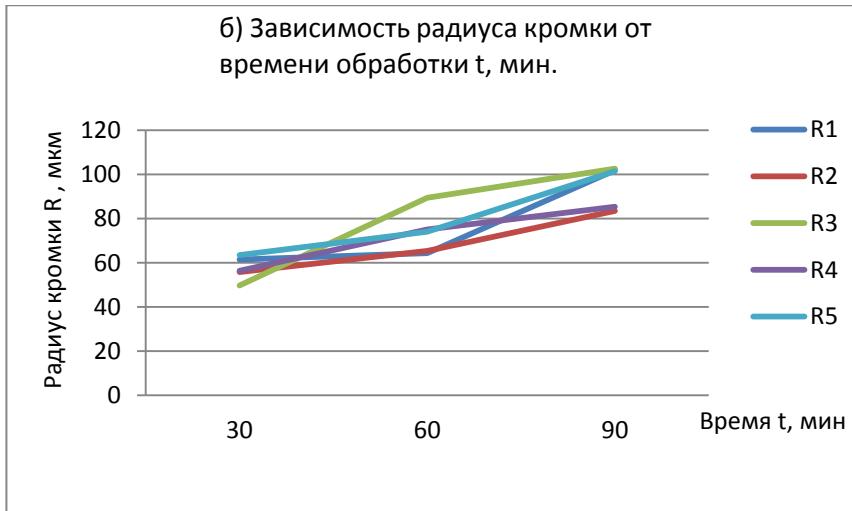


Рис.4. Б) Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, Рабочая среда - бой абразивных кругов грануляции 15x20мм, амплитуда колебаний,  $A = 1\dots 1,5\text{мм}$

Таблица 3.

Изменение радиуса кромок от времени обработки;  
рабочая среда бой абразивных кругов +Стальные шары диаметр 7мм, амплитуда колебаний,  $A = 1\dots 1,5\text{мм}$

Значение исходного радиуса кромки $R$ , мкм	Время обработки (час)					
	1	2	3	4	5	6
$R_1 = 65.66$	89.7	99.65	109.6	112.20	116.3	132.87
$R_2 = 45.87$	71.7	81.38	93.56	88.0	124.6	106.29
$R_3 = 48.35$	74.5	87.5	96.7	109.6	164.4	142.83
$R_4 = 55.45$	99.2	91.7	91.0	114.6	156.1	149.47
$R_5 = 68.74$	84.6	85.3	89.6	132.9	161.2	146.15

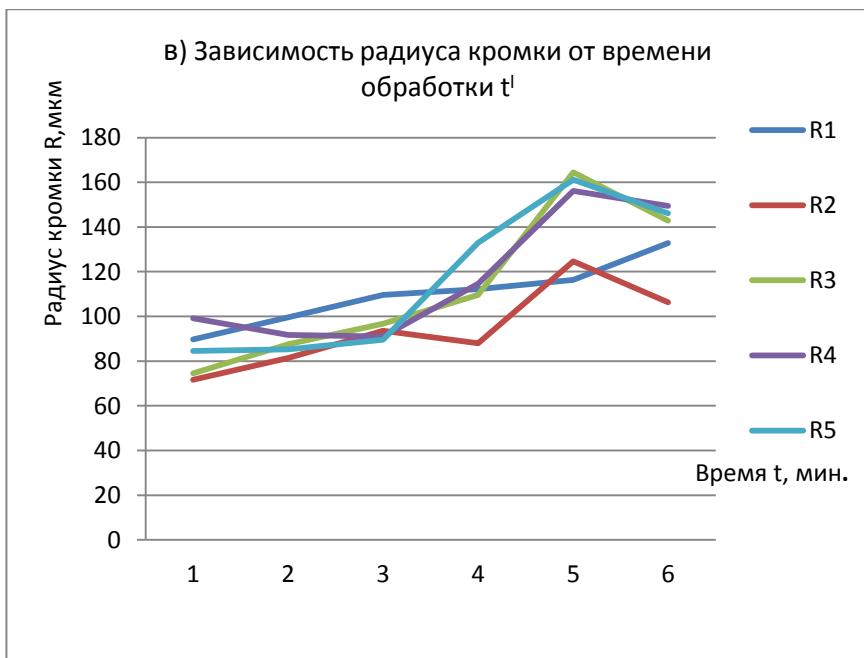


Рис.4. В) Влияние времени обработки на изменение радиуса кромок, Рабочая среда - бой абразивных кругов грануляции 15x20мм, амплитуда колебаний,  $A = 1\dots 1,5\text{мм}$

Таблица 4.

Изменение радиуса кромок от времени обработки;  
рабочая среда бой абразивных кругов, амплитуда колебаний,  
 $A=3\text{мм}$

Значение исходное радиуса кромки $R$ , мкм	Время обработки $t$ (час)					
	30	1	2	3	4	5
$R_1 = 95.66$	109.6	164.42	234.2	265.73	315.56	325.52
$R_2 = 98.87$	111.28	217.57	215.91	232.54	293.96	368.7
$R_3 = 95.38$	109.61	137.85	157.78	222.55	247.46	302.25
$R_4 = 87.46$	91.34	147.8	192.32	202.62	332.2	325.52
$R_5 = 88.75$	107.95	182.69	296.62	338.81	297.28	285.7
$R_{cp} = 93.22$	105.96	170.1	219.4	252.5	297.3	321.54

г) Зависимость радиуса кромки от времени обработки  $t$

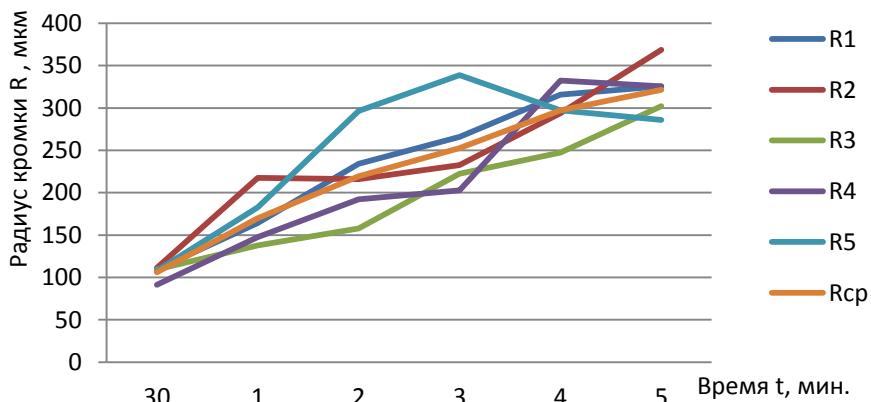


Рис.4. Г) Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, рабочая среда - бой абразивных кругов грануляции 15 x 20мм, амплитуда колебаний, А =3мм

Анализ представленных результатов исследований показывает, что с увеличением времени обработки, радиус кромки деталей увеличивается. Отмечено также что, на интенсивность скругления радиуса кромки оказывает влияние характеристика абразивной (инструментальной) среды, её режущие свойства. Например, наибольший радиус кромки получен в среде бой абразивных кругов, обладающих более высокой абразивной (режущей) способностью. Следует иметь в виду, что увеличение радиуса кромки роликов подшипников качения, имеет определённые ограничения[1, с.23].

1. Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Гиллеспи Л.К. и др. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно -зачистной обработки деталей (очистка мойка удаление облоя и заусенцев обработка кромок). Научное издание. – Ростов Н/д: Издательский центр ДГТУ, 2010.-287с.

2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд. 2-е, перераб. И доп. – Ростов Н/д: Издательский центр ДГТУ, 2008.-694 с.

3. Бабичев А.П., Тамаркин М.А. и др. Физико- технологические основы методов обработки. Учеб. пособие. – Ростов Н/д: Издательский центр ДГТУ, 2003.-430 с.

4. Лайм Кимленг. Кандидатская диссертация. – Ростов Н/д, ДГТУ, 2003.-217 с

**УДК 539.3**

**КОНЦЕПЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ  
ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА БИ-МАТЕРИАЛА**

*Соболь Б.В., Рашидова Е.В., Борисова Е.В.*

ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Изучение влияния трещин на прочность деталей машин из современных материалов представляется весьма актуальным. К таким материалам, в частности, относятся армированные, композитные материалы, металлокерамика и многие другие биматериалы. Широкое распространение в технике получили также детали с покрытиями, улучшающими их механические и физико-химические свойства. Особый теоретический и практический интерес представляют задачи об изучении концентрации напряжений в окрестности трещин, находящихся вблизи границы раздела материалов, выходящих на границу или пересекающих ее. В задачах о трещинах в составных упругих телах оптимальным выбором геометрических и физических параметров иногда можно добиться уменьшения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и, тем самым, предотвратить их распространения.

Рассмотрена задача о концентрации напряжений в окрестности вершины трещины конечной длины, расположенной перпендикулярно границе раздела двух упругих тел – полуплоскости и полосы. Использование обобщенного метода интегральных преобразований позволило свести задачу к решению сингулярного интегрального уравнения с ядром Коши. Рассмотрены предельные случаи задачи, когда толщина полосы относительно мала, равна нулю (свободная полуплоскость) и, наоборот, бесконечно широка.

В случае, когда толщина полосы относительно мала, вводится предположение, что полоса (в данном случае, тонкое покрытие) является абсолютно гибким, но упругим на растяжение, и ее влияние можно моделировать специально сформулированным граничным условием.

Во всех предельных случаях, когда покрытие тонкое, составной упругой плоскости и полуплоскости, ослабленной внутренней поперечной трещиной, удается получить аналитическое представление регулярной части ядра

интегрального уравнения и построить решение сингулярного интегрального уравнения в виде разложения в ряд по малому параметру.

Для определения диапазона эффективности аналитических решений, а также в случае общей постановки задачи, решение интегрального уравнения построено методом коллокации. В общем случае постановки задачи, с целью повышения эффективности численного метода, использовано приближение регулярной части ядра в специальной форме. Наряду с численным методом, во всех рассмотренных случаях построено аналитическое решение задачи методом малого параметра. Получены значения коэффициента интенсивности нормальных напряжений в окрестности вершины трещины для различных комбинаций геометрических и физических параметров задачи.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке  
РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-00142\_а.**

**УДК 621.9.048.6**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДИФФУЗИИ ЦИНКА ПРИ ЕГО  
НАНЕСЕНИИ НА СТАЛЬНУЮ ПОДЛОЖКУ МЕТОДОМ  
ВиМХТО**

*Анкудимов Ю.П., Чернега Ю.Г., Рейзвих В.А.  
Таганрогский политехнический институт(филиал)ДГТУ,  
г.Таганрог, Россия*

На основе изучения основных закономерностей комбинированных методов металлообработки и технологических возможностей вибрационной обработки (ВиО) разработан ряд схем подвода дополнительной рабочей энергии различной природы в зону контакта обрабатывающей среды с деталями при реализации процесса их обработки. Данные разработки являются основой для комплексного повышения качества поверхности обрабатываемых деталей, создания конструкций вибрационных станков и дополнительных устройств к ним, позволяющих существенно расширить технологические возможности вибрационной обработки [1,2]. Так, использование дополнительного теплового воздействия и энергии химических

реакций в процессе ВиО получило название вибрационной механо-химико-термической обработки (ВиМХТО).

Применение повышенных температур (до 120-400°C) позволяет осуществлять этим методом ряд новых технологических операций. Вибрационная обработка, осуществляемая при температуре 0,2-0,5  $T_{пл}$  материала обрабатываемых деталей, позволяет наносить в процессе обработки металлические антисорбционные покрытия (цинк, алюминий), неметаллические антифрикционные покрытия (графит, дисульфид молибдена) и другие материалы.



Рис.1. Микроструктура цинкового покрытия нанесённого методом ВиМТО(х1350)

Совмещенный процесс ВиМХТО и цинкования производится в герметично закрытой рабочей камере (без доступа воздуха). В качестве рабочей среды используются

стальные шары, дробь, ситаловый бисер и порошок цинка с добавлением в его состав 5% (по объему) хлористого аммония, при разложении которого от нагрева образуется восстановительная атмосфера. Температура процесса 200-300°C. Полученное таким способом цинковое покрытие состоит из верхнего слоя - частиц цинкового порошка, соединенных между собой и диффузионной зоны цинкового феррита, ширина которой зависит от температуры обработки (рис. 1). Эта зона содержит до 5% цинка и отличается повышенной твердостью. Значения микротвердости в ней 1900-2500 МПа, в то время как микротвердость пластически деформированных зерен феррита составляет 1700-1800 МПа (основной металл - сталь 08кп). Обработка при температуре 250°C в течение 90 мин приводит к диффузии цинка на глубину 30-40 мкм. Постепенно эта зона переходит в основную структуру - феррит с повышенной микротвердостью, которая на глубине 150 мкм понижает микротвердость до исходных значений 1350-1500 МПа.

Рост толщины покрытия, связанный с диффузией цинка в металлической основе может быть аппроксимирован зависимостью:

$$h = 2\sqrt{D \cdot t}, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина слоя, см;  $t$  – время, сек;  $D$  – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии по Френкелю можно представить следующим образом:

$$D = A \cdot e^{\frac{-Q}{RT}} = A \cdot e^{\frac{-B}{T}}, \quad (2)$$

где  $A = D_0$  – предэкспоненциальный фактор, не зависящий от температуры;  $R$  – газовая постоянная;  $Q$  – энергия активации;  $T$  – температура, °К.

Данная зависимость позволяет (определив экспериментально для какого-либо одного режима постоянные А и В) рассчитывать толщины образующихся диффузионных покрытий при любых иных режимах обработки и сравнивать их с соответствующими коэффициентами, при традиционном диффузионном цинковании.

Для определения коэффициентов А и В проведены экспериментальные исследования процесса ВиМХТО в широком температурном диапазоне. Эксперименты проводились при

следующих режимах: температура нагрева рабочей зоны –  $T$  = от 180°C до 400°C, время обработки –  $t$  от 1 до 6 часов, амплитуда колебаний 2,5-3 мм. В исследованиях использовались образцы из стали 30. Диффузионная смесь состояла из цинкового порошка с добавлением хлористого аммония в процентном соотношении к массе цинка (2%) для активации процесса. В диффузионную смесь добавляли ситаловый бисер для лучшего перемешивания среды и интенсивного перемещения деталей. В результате экспериментов на образцах получено цинковое покрытие, различное по толщине. Определение толщины покрытия осуществлялось двумя методами: по привесу образцов в процессе покрытия и методом химического стравливания покрытия. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Расчет параметров  $A$  и  $B$  рассмотрим при следующих режимах:  $T = 493\text{K}$ ,  
 $t = 10800\text{c}$  и  $T = 453\text{K}$ ,  $t = 10800\text{c}$ .

Составив и решив систему уравнений:

$$\begin{cases} h_1 = 2\sqrt{A \cdot t_1 \cdot e^{\frac{-B}{T_1}}} \\ h_2 = 2\sqrt{A \cdot t_2 \cdot e^{\frac{-B}{T_2}}} \end{cases} \quad (3)$$

Получим значения искомых параметров:  $A = 9,1 \cdot 10^{-6}$  и  $B = 5660$ .

Из выражения (2) можно определить значения коэффициента диффузии с учетом того, что  $B = \frac{Q}{R}$ ,

$$D = A \cdot e^{\frac{-B}{T}} = 9,3 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\text{мм}^2}{\text{сек}} \right). \quad (4)$$

На рис. 2 приведены значения толщин диффузионных цинковых покрытий, полученных экспериментально и методом расчета по уравнению (1). Как видно из рисунка между этими значениями наблюдается удовлетворительная сходимость.

Для сравнения проведены эксперименты по нанесению цинкового покрытия, с применением традиционной технологии (без наложения виброударного воздействия) и также вычислен коэффициент диффузии: при  $T=493\text{K}$ ,  $A=2,5$  мм ( $D = 4,85 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\text{мм}^2}{\text{сек}} \right)$ ). Полученные результаты подтверждают, что процесс

диффузии при цинковании методом ВиМХТО протекает быстрее в 1,5-2 раза, чем при традиционном цинковании в неподвижных муфельных печах.

Таблица 1.

Толщина цинкового покрытия

Время обработки, сек	Толщина покрытия (экспер.), мкм	Толщина покрытия (расч.), мкм
3600	7	11,5
7200	16	16
10600	22	19,8
14400	25	22,8
18000	27	25,88
21600	29	28,3

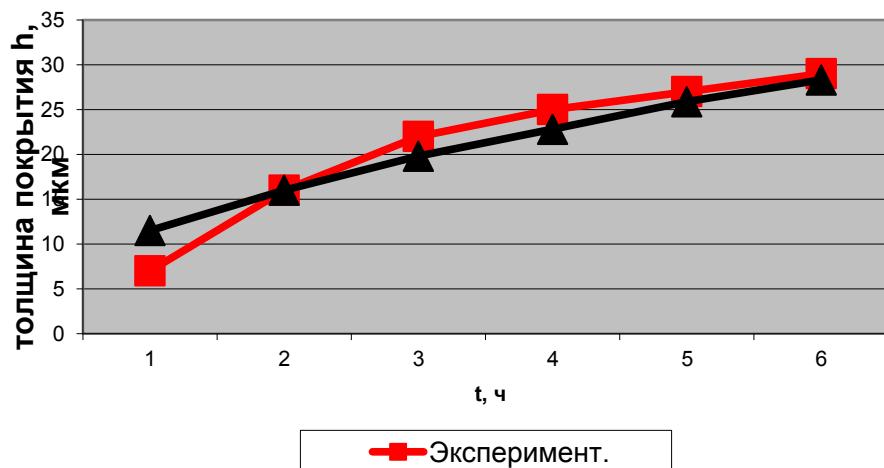


Рис. 2. Изменение толщины покрытия от времени обработки

1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. /Ростов-на-Дону. Издательский центр ДГТУ, 2008. - 694с.

2. The Quality Rising of Precision Surface by Mecanic Chemical Vibratory Finishing Y.P. Ankudimov, A.P. Babichev, S.V. Milaeva, S.N. Hudoley, V.V. Ivanov 6th International Conference "Precision Surface Finishing and Deburring Technology - 2000" «PSFDT - 2000», Saint-Petersburg 2000, 3 pages.

3.Complex Change in Superficial Layer Properties of Specimen Obtained by Metallurgical Powder Vibration Process Method. Khaled Hamouda, Y.P Ankudimov : Defekt and Diffusion Forum Vols297-301(2010)pp1103-1108. Trans Tech Publications Switzerland

## **УДК 621.923.9**

### **ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД СКЛЕИВАНИЕ**

*Козулько Н.В.*

ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия

При изготовлении вертолетов, самолетов, катеров и т.п. многие детали изготавливаются из ПКМ. Такие детали представляют собой тела различной конфигурации (тела вращения, корпусные детали, тонкостенные, длинномерные, имеющие криволинейную поверхность). Распространенной технологией соединения деталей из ПКМ является технология склеивания. Подготовка поверхностей под склеивание является одной из наиболее ответственных операций технологического процесса склеивания. От этой операции зависит адгезионная прочность kleевых соединений. Для подготовки поверхности деталей из ПКМ под склеивание с ответными деталями, изготовленными из металла, композиционного материала, резины, дерева и т.д. применяется различные методы обработки (механическая обработка, формование поверхности путем передачи рисунка ткани при прессовании, химическая обработка). На предприятии предпочтение отдается механической обработке.

На базе предприятия по производству лопастей проведена серия экспериментальных исследований прочности kleевого соединения деталей из ПКМ (таблица 1): обработанных шлифовальной шкуркой ГОСТ13344-79 зернистостью №№40, 12, 8, 6, 4 рекомендованной ВИАМ (Всероссийский институт авиационных материалов).

Зависимость шероховатости поверхности образцов от зернистости шлифовальной шкурки приведены на рисунке 1.

Таблица 1  
Наименование и параметры образцов из ПКМ

Наименование детали	Вид ПКМ	
	матрица (основа)	связующие
лонжерон лопасти рулевого винта (ЛРВ)	стеклонить ВМПС ТУ6-48-111-94	ЭДТ-10ППИ1.2.029-77
нагревательный пакет ПОС ЛРВ	стеклоткань Э-3-100 ГОСТ19907-83	ВК-3 РТ ТУ1-595-14-486-2013
Обшивка хвостового отсека ЛРВ	стеклоткань Т10-14 ГОСТ19170-2001	ЭДТ-10П ПИ1.2.029-77

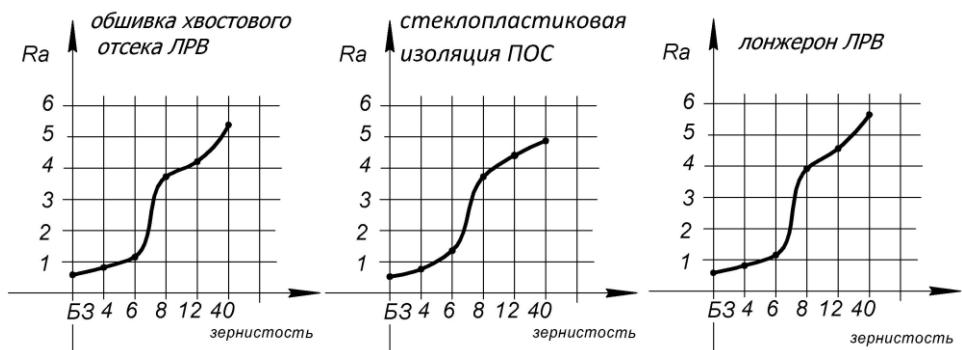


Рисунок 1. Зависимость шероховатости поверхности образцов от зернистости шлифовальной шкурки.

По результатам измерений видно, что при увеличении размера абразивного зерна шлифовальной шкурки шероховатость обработанной поверхности тоже увеличивается. Графики демонстрируют заметное увеличение шероховатости поверхности с переходом на зернистость шлифовальной шкурки с №6 на №8.

Испытание влияния микропрофиля зашкуренных образцов на прочность клеевого соединения (на сдвиг, на отрыв) проводилось на образцах, повторяющих клеевое соединение лопасти вертолета.

Результаты испытания образцов-свидетелей клеевых соединений деталей из ПКМ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытания образцов-свидетелей

Вид соединения	Зернис- тость	Шеро- хова- тость	Прочность на разрыв						Результат	
			На сдвиг, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$			На отрыв, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$				
			1	2	3	1	2	3		
Обшивка хвостового отсека + лонжерон	40	5,24	49	43	52	2,1	2,0	2,3	Соответ.	
	12	4,18	52	54	53	3,2	3,1	3,0	Соответ.	
	8	3,8	64	72	75	5,2	5,3	5,8	Соответ.	
	6	1,04	88	83	78	5,3	5,2	5,1	Соответ.	
	4	0,72	35	32	28	1,2	1,8	1,3	Не соответ.	
	Б3*	0,67	20	21	28	2,3	2,1	2,0	Не соответ.	
Стеклопластиковая изоляция + лонжерон	40	4,87	38	29	36	3,6	3,4	3,2	Не соответ.	
	12	4,27	61	63	66	3,9	4,1	4,3	Соответ.	
	8	3,85	86	115	109	6,8	6,4	6,1	Соответ.	
	6	1,24	96	101	86	5,8	6,1	6,3	Соответ.	
	4	0,97	58	56	54	2,6	2,8	2,1	Соответ.	
	Б3*	0,69	38	40	44	1,4	2,1	1,6	Не соответ.	
Стеклопластиковая изоляция + оковка	40	5,58	44	43	40	3,2	2,8	2,7	Соответ.	
	12	4,65	56	53	58	3,8	3,2	3,1	Соответ.	
	8	3,94	78	111	108	6,3	6,2	6,0	Соответ.	
	6	1,17	93	92	90	6,2	6,1	6,0	Соответ.	
	4	0,81	44	48	43	2,4	2,3	2,6	Соответ.	
	Б3*	0,67	31	42	40	2,4	2,6	2,0	Не соответ.	
Б3* - образец без зашкуривания										

Полученные данные испытаний демонстрируют, что наилучшие показатели по прочности клеевого соединения и по характеру разрушения у образцов обработанных шлифовальной шкуркой №6, №8 и №12. Образцы обработанные шлиф.шкуркой №40 и образцы без зашкуривания испытания не выдержали.

Из ПКМ изготавливаются и малогабаритные детали (тела вращения, корпусные детали, заглушки, компенсаторы и т.п.). Использование шлиф.шкурки или шлиф. инструмента становится проблематично, так как они используются для обработки плоских поверхностей, либо поверхностей тел вращения, в некоторых случаях линейчатых. Исполнитель сталкивается с невозможностью обработки труднодоступных мест, таких как углы, радиусные переходы, ребра жесткости. Для таких случаев целесообразно рассмотреть обработку деталей из ПКМ свободными абразивами (вибрационная обработка (ВиО), центробежно-ротационная обработка (ЦРО), струйноабразивная обработка (САО), турбоабразивная обработка (ТАО) и т.п.). При обработке свободными абразивами зерна более полно используют свои режущие способности, так как происходит равномерное распределение их режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также переориентация и перемещение в процессе обработки. [4]

Теоретическое определение параметров шероховатости обработанной поверхности КМ при ВиО является трудной задачей вследствие большого числа переменных факторов, влияющих на процесс формирования профиля шероховатости поверхности. Основываясь на зависимостях параметров шероховатости металлических поверхностей при обработке свободными абразивами выведенных в работах д.т.н. Тамаркина М.А., можно привести зависимости для расчета условной высоты и среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости при обработке КМ:

$$H_{\delta n} = 0.58 \cdot k_{\hat{E}l} \sqrt{\frac{h_{\max} L_{\hat{a}\hat{a}}}{z_0}}$$

$$Ra = 0.09 \cdot k_{\hat{E}l} \sqrt{\frac{h_{\max} L_{\hat{a}\hat{a}}}{z_0}}$$

$$h_{\max} = 2k_m^{0.5} V_0 R \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_r}{3k_R c \sigma_s}}$$

где,  $h_{max}$  – максимально возможная глубина внедрения частицы;  
 $L_{e\partial}$ –длина единичного отрезка;

$z_0$ –номинальное количество зерен на единице поверхности абразивной гранулы;

$k_m$  – коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке;

$V_0$  – скорость движения частиц;

$R$  – характерный размер частицы (радиус);

$\beta$  – угол движения частицы к поверхности детали;

$\rho_r$  – плотность частицы;

$k_R$  – коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта;

$C$  – коэффициент оценивающий несущую способность контактной поверхности;

$\sigma_s$  – предел текучести материала детали;

$k_{KM}$  – коэффициент учитывающий свойства поверхностного слоя КМ, такие как:

- ярко выраженная анизотропия структуры, механических и физических свойств материалов;
- высокая твердость наполнителя (до 40...43 ГПа) и его абразивное воздействие на инструмент;
- низкая теплопроводность (0,2...0,5 Вт/(м·К) и теплостойкость (160...300 °C);
- высокие упругие свойства (до 300 ГПа), влияющие на точность;
- склонность к водопоглощению, предотвращающая использование смазывающей охлаждающей жидкости (СОЖ).

Как видно из таб. 2 наибольшая прочность kleевого соединения получается при шероховатости поверхности склеиваемых деталей  $R_a=(1,04 \div 3,94)\text{мкм}$ . Пользуясь выше приведенными зависимостями можно подобрать режимы ВиО и характеристики абразивных сред для получения нужного значения шероховатости.

Аналогичные зависимости получены и для других методов обработки свободными абразивами. Выбор метода обработки во многом определяется конфигурацией и размерами обработанных деталей. Таким образом после проведения необходимых экспериментальных исследований, для определения величины коэффициента  $k_{km}$  для различных методов обработки свободными абразивами мы можем проектировать технологические процессы обеспечивающие механизацию подготовки деталей под склеивание.

- 
1. Л. Ковачич, перевод И.В. Холодовой под ред. д.т.н А.С. Фрейдина. Склейивание металлов и пластмасс//, Москва «Химия» 1985.
  2. Пащенко Ж.А., Рыбальченко С.Н., Сердюк А.Д. Полимерные композиционные материалы и их применение в самолетостроении//учебное пособие, Таганрогский авиационный колледж имени В.М. Петлякова— 1993.
  3. Зинина И.Н., Технологическое обеспечение качества адгезионных соединений на основе учета влияния микропрофиля поверхностей деталей. диссертация... кандидата технических наук: Москва 2003.
  4. Тамаркин М.А., Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. г. Ростов-на-Дону, 1995г.

## **УДК 621.791.3.8**

### **ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ- ФОРМОВКИ ОБЛЕГЧЁННЫХ ЭКРАНИРУЮЩИХ КОРПУСОВ ЗАДЕЛКИ КАБЕЛЯ В ШТЕПСЕЛЬНЫЙ РАЗЪЁМ**

*Агеев С.О., Лемешев С.В., Рачков М.А., Перлов Д.С.,  
Нескоромный С.В.*  
ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, Россия

Существенной частью конструкций, определяющей надежность и вес космических аппаратов, является бортовая кабельная сеть (БКС).

Развитие современной электронной техники, применяемой в космических аппаратах, привело к резкому уменьшению токов потребления. Токи стали соизмеримы с электрическими помехами, при этом резко возросли требования разработчиков систем к точности передачи сигналов и минимуму потерь и искажений. Для защиты от высокочастотных излучений требуется экранирование всех элементов кабелей от помех с помощью экранирующей плетёночки и специальных облегчённых

корпусов.

Разработчикам ГКНПЦ им. М. В. Хруничева удалось пересмотреть конструкцию БКС и создать новые, значительно более легкие составные части кабелей. В настоящее время сделаны практические шаги по внедрению новых технологий для узлов заделки кабелей. В частности, впервые спроектирован новый узел заделки кабеля с облегченной цельнометаллической оболочковой экранировкой. Облегченный экранирующий корпус заделки кабеля в штепельный разъём является типичной трубчатой деталью сложной формы.

Для изготовления облегченной конструкции трубчатых деталей была предложена и освоена технология изготовления штампованных корпусов из алюминиевой фольги толщиной 0,15-0,2 мм методом магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ) [1].

Эскиз экранирующего корпуса-соединителя приведён на рис. 1.

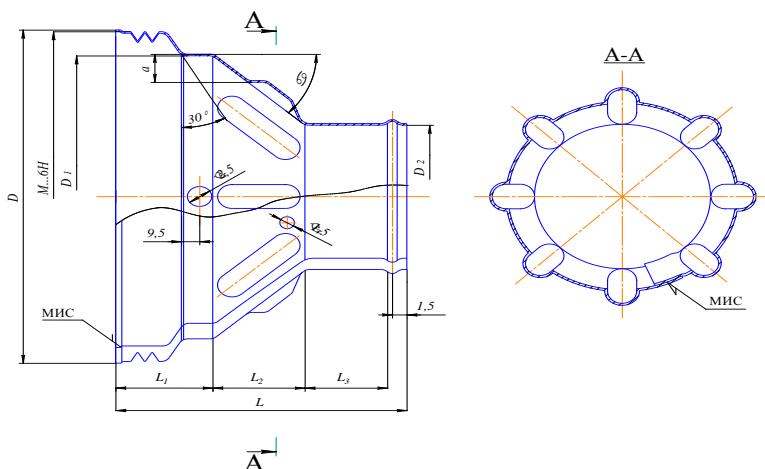
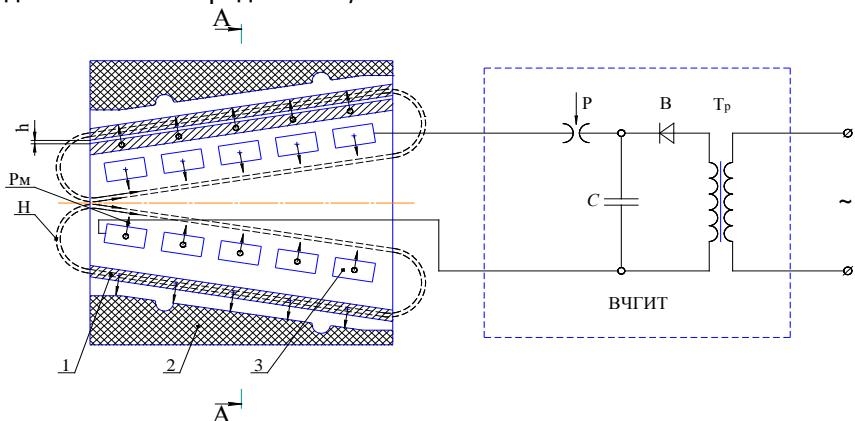


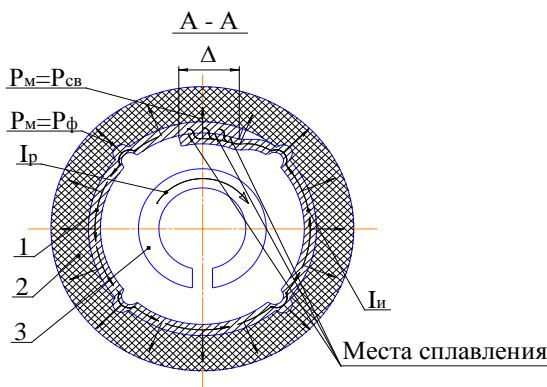
Рис. 1. Эскиз экранирующего корпуса-соединителя.

Перед сваркой фольга может проходить специальное химическое оксидирование с образованием на поверхности электропроводных окислов алюминия, но этот процесс является необязательным. Проведенный расчёт необходимой рабочей частоты Прочность данного материала обеспечивала требуемую

долговечность (более 1000 циклов) при сварочном (магнитном) давлении Рсв порядка 10 кг/мм<sup>2</sup>.



а) Начало процесса



б) Окончание процесса

Принципиальная схема совмещённого процесса МИОМ.

1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – индуктор;  $h$  – исходный зазор;  $\Delta$  – переход лист; ВЧГИТ – высокочастотный генератор импульсных токов; Тр – трансформатор; В – выпрямитель; С – конденсаторы; Р – разрядник;  $I_p$  – ток разряда; Н – магнитный поток;  $I_i$  – ток индуцированный; Рм – магнитное давление; Рф – давление формовки; Рсв – сварочное давление.

Рабочая частота при сварке многовитковых индукторов не превышала значения 50 кГц [2], что приводило к проникновению части магнитного потока в зазор заготовка - матрица и в саму оснастку, однако никакого противодавления за счёт «магнитной подушки», заготовка не испытывала. Неизбежно терялась часть энергии заряда, уменьшался КПД процесса, но без ущерба качеству обработки. На рис. 2 представлена принципиальная схема обработки показал, что для осуществления МИСФ без «магнитной подушки» [2] необходима установка, с генератором импульсов тока, обеспечивающих рабочую частоту порядка 200-300 кГц. Создать промышленную установку с данными параметрами на базе стандартных комплектующих (конденсаторов) не представляется возможным, поэтому сварка производилась с использованием диэлектрических матриц. Оснастка изготавливается из стеклотекстолита

Качество сварки трубчатых деталей оценивалось визуально, механическими испытаниями и термоциклированием. Кроме этого, облегченные корпуса в составе кабелей БКС прошли все виды динамических испытаний, включая испытания на долговечность. Кабельная продукция соответствует техническим требованиям на изделия. При этом масса узла заделки уменьшилась в 10 раз по сравнению со стандартной конструкцией.

---

1. Глущенков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов/ В.А. Глущенков, В.Ф.Карпухин. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.

2. Экспериментальные исследования процесса контактной магнитно-импульсной сварки / В. В. Плотников, О. В. Яценко, Р. К. Юсупова // Известия ВУЗов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2001. - № 3. – С. 38-41.

## **V. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**УДК 621.74**

### **ПРИВОД УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБ С ВОЗВРАТНО- ВИНТОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

*Искович-Лотоцкий Р.Д., Булыга Ю.В.*

ВНТУ, г. Винница, Украина

Анализ существующих разновидностей процесса вибрационной обработки показывает, что именно наличие тех или иных видов движений рабочей среды или обрабатываемых деталей, специально осуществляемых механизмами дополнительного воздействия станка, определяют характерные особенности процесса.

Наиболее распространенной схемой нагружения в станках для виброабразивной обработки является двухкомпонентная вибрация с плоскостной траекторией движения частиц рабочей среды. Более эффективной при виброабразивной обработке деталей является трехкоординатная (пространственная) схема нагружения. По данной схеме рабочей среде и обрабатываемым деталям сообщается циркуляционное и центробежное движение, а рабочей камере сообщается движение по круговой траектории.

Однако эти схемы нагружения возможно реализовать при обработке мелких деталей. Для обработки крупногабаритных заготовок реализация данных схем затруднена ввиду отсутствия достаточно мощного оборудования.

При разработке схем нагружения для крупногабаритных изделий необходим индивидуальный подход, в зависимости от типа заготовки. При определенном сочетании направленных вибрационных воздействий можно добиться циркуляции частиц абразивного материала по контуру обрабатываемой поверхности, что значительно повышает эффективность процесса обработки.

На рисунке 1 представлены возможные схемы нагружения при вибробразивной обработке внутренних поверхностей длинномерных труб большого диаметра.

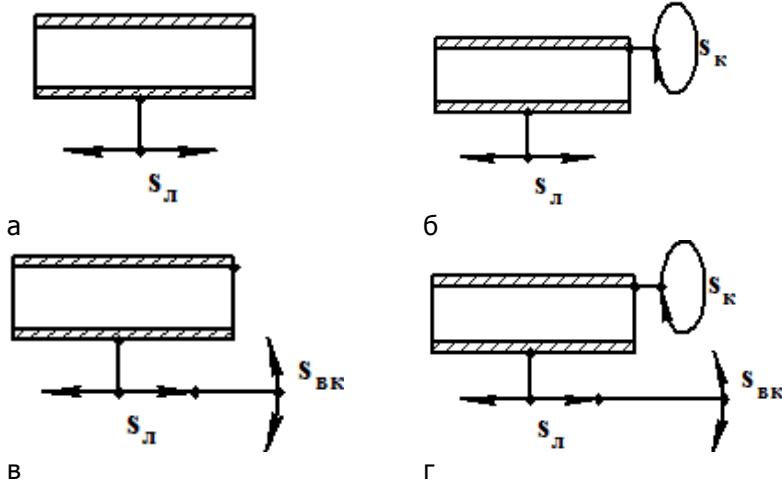


Рисунок 1 Сложно-пространственная вибробразивная обработка труб большого диаметра и возможные схемы их принудительного движения

По схеме (см. рис. 1 а) заготовке сообщается возвратно-поступательное перемещение  $S_{л}$ . По схеме (см. рис. 1 б) заготовка также совершает возвратно-поступательные перемещения  $S_{л}$ , однако для более равномерной обработки заготовке сообщается круговое движение  $S_{кр}$ , при этом абразивная масса получает центробежное движение  $S_{цб}$ . Практический интерес представляет схема показанная на рис. 1 в. Рабочим движением по этой схеме являются одновременные колебательные возвратно-поступательные движения  $S_{л}$  трубы и возвратно-круговые (возвратно-винтовые) движения  $S_{вк}$ . Перспективной является схема (см. рис. 1 г), где к основным движениям по схеме (см. рис. 1 в) трубе сообщается дополнительное постоянное вращение  $S_{к}$ .

Для реализации схем нагружения (см. рис. 1) наиболее эффективным может быть гидроимпульсный привод, который позволяет передавать большие мощности, широко регулировать параметры вибробоработки по амплитуде и частоте.

В результате анализа технологических схем нагружения обрабатываемой заготовки и данных проведенных экспериментов, выявлено, что более эффективной является схема нагружения (см. рис. 1 в), когда заготовке сообщаются два технологических движения возвратно-поступательное  $S_{л}$  и возвратно-круговое (возвратно-винтовое)  $S_{вк}$ .

Нами был предложен гидроимпульсный привод, позволяющий реализовать эту схему нагружения.

Сложное движение исполнительного звена образуется в результате сложения горизонтальных возвратно-поступательного и возвратно-кругового движений, создаваемых одновременными ходами плунжеров исполнительных гидроцилиндров.

Для управления движениями плунжерами гидроцилиндров применен вибровозбудитель подключенный по схеме «на выходе».

Принципиальная схема гидроимпульсного привода изображена на рисунке 2.

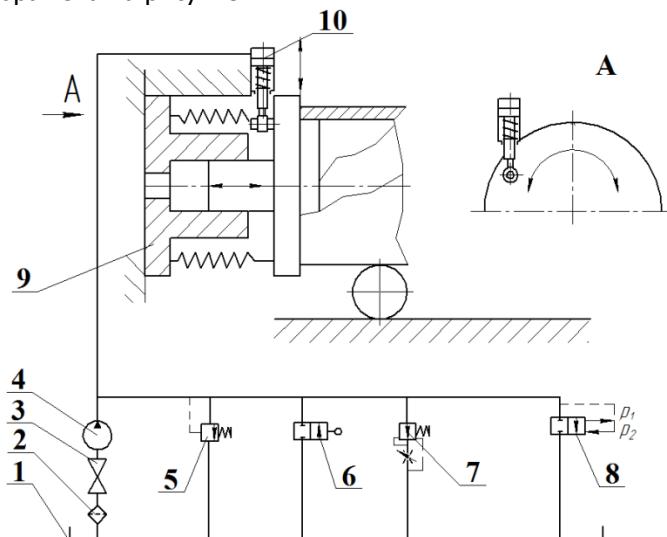


Рисунок 2 Принципиальная схема гидроимпульсного привода, обеспечивающего возвратно-круговое (возвратно-винтовое) движение

Она включает в себя гидробак 1, в котором встроен фильтр 2. Фильтр 2 устанавливается на всасывающей

гидролинии и связывается через кран 3 с шестеренным гидронасосом 4. В напорной гидролинии включены параллельно:

- предохранительный клапан 5;
- золотниковый распределитель 6;
- регулятор потока 7;
- вибровозбудитель 8;
- линейный гидроцилиндр 9;
- угловой гидроцилиндр 10.

Выходы перечисленной гидроаппаратуры соединены с общей сливной гидролинией, которая через кран 11 связывается с баком 1.

Принцип работы привода следующий:

- при включенном золотниковом распределителе 6 энергоноситель от насоса 4 через фильтр 2 и кран 3 по гидролиниям поступает в рабочую полость линейного 9 и углового 10 исполнительных гидроцилиндров и вызывает в последней увеличение давления до величины, необходимой для преодоления сил стационарного сопротивления движению плунжеров. С момента начала движения плунжеров силы сопротивления возрастают по мере деформирования пружин упругого возврата и, соответственно, возрастает давление в рабочей полости исполнительных гидроцилиндров до давления  $p_1$ , при котором срабатывает вибровозбудитель 8 и открывает доступ энергоносителю из полости гидроцилиндров 9 и 10 и от насоса 4 на слив. Под действием упругих сил пружин возврата плунжеры линейного и углового движения возвращаются в исходное положение и подача энергоносителя из рабочей полости гидроцилиндров на слив через вибровозбудитель прекращается. Давление в среде при этом падает и становится меньше давления  $p_2$  закрытия вибровозбудителя. Вибровозбудитель закрывается и начинается новый рабочий цикл.

Для обеспечения максимальной жесткости и надежности гидросистемы привода установки все элементы гидросистемы и вибровозбудитель соединяются между собой притычным способом.

Предложенная конструктивная схема гидроимпульсного привода, показанная на рисунке 3, включает в себя два исполнительных гидроцилиндра – линейный 1 и угловой 2.

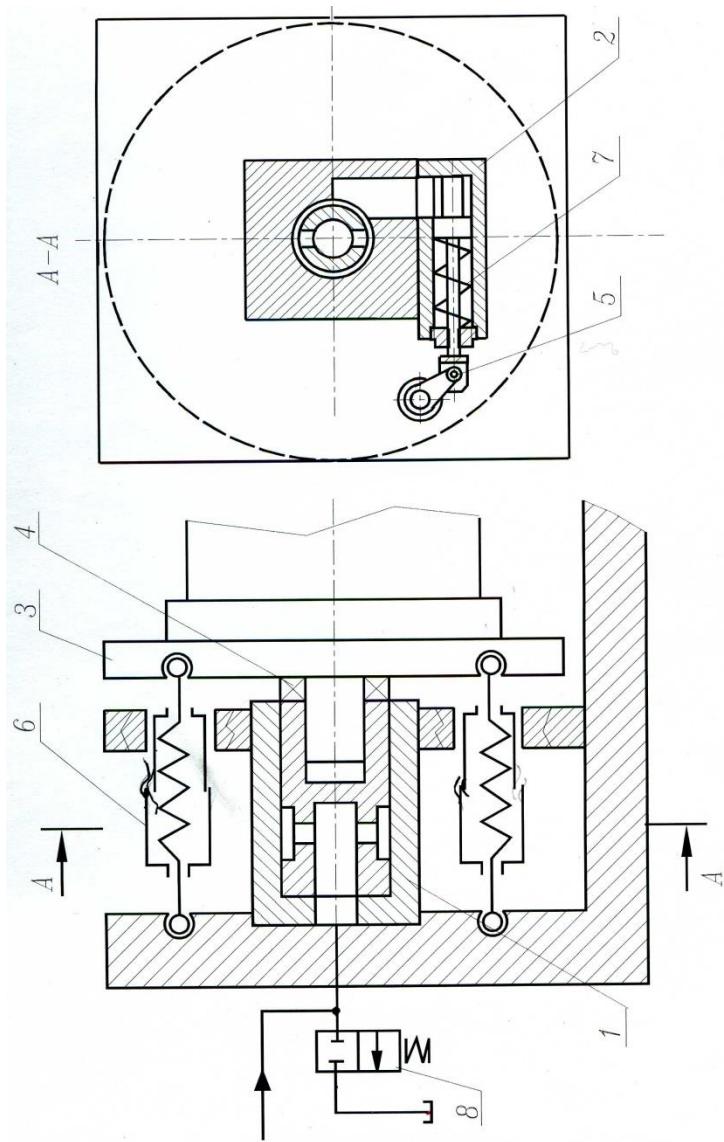


Рисунок 4 Конструктивная схема гидроимпульсного привода, обеспечивающего возвратно-круговое (возвратно-винтовое) движение

Линейный гидроцилиндр 1 напрямую связан с исполнительным звеном 3 установки через радиально-упорный подшипник 4, а угловой – кривошипно-ползунным механизмом 5, включающего в себя: ведущее звено – плунжер гидроцилиндра; шатун; ось вращения кривошипа, которая смешена относительно линии перемещения плунжера.

Возврат исполнительного звена в исходное положение осуществляется элементами упругого возврата 6, 7, у которых предварительное натяжение можно регулировать независимо.

---

1. Іскович-Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р. До питання синтезу схем гідроімпульсних вібромашин з декількома робочими ланками //Вісник Вісник Вінницького політехнічного інституту.- 1994.- №1(2).- С. 82-88

2. Булыга Ю.В. Разработка и исследование гидроимпульсного привода установки для вибраабразивной очистки крупногабаритных деталей: Дис... канд.техн.наук: 05.02.03. –Винница, 210 с.

## УДК 629.11

### **ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ В НАПРАВЛЯЮЩИХ ТОКАРНОГО СТАНКА НА ТОЧНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СИЛ РЕЗАНИЯ**

*Мельникова Е.П., Быков В.В., Боднар С.В.*

Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета. Горловка, Украина

Для управления точностью процесса обработки резанием необходимо обеспечить точность взаимного расположения инструмента и обрабатываемой детали [1,2,3,4]. Это актуально при восстановлении тормозных дисков непосредственно на автомобиле с применением токарного станка с гидравлической системой стабилизации сил резания [5].

Направляющие резцодержателей станка обеспечивают необходимое взаимное расположение резцов и возможность их перемещения относительно тормозного диска. Взаимные возвратно-поступательные движения резцодержателей прямоугольной формы с одной степенью свободы способствуют постоянному изменению действующих сил в направляющих. Скорости скольжения в направляющих определяются

кинематикой и динамикой функционирования гидравлической системы стабилизации сил резания.

Целью данной статьи является изучение влияния сил трения в динамике на чувствительность гидравлической системы стабилизации сил резания при перемещении резцодержателей в прямоугольных направляющих токарного станка для восстановления тормозных дисков автомобилей.

Для достижения поставленной цели рассмотрим характер действия сил трения в направляющих скольжения двурезцового токарного станка с внутренней гидравлической системой стабилизацией сил резания, изображенных на рисунке 1.

На каждом резце, закрепленном на передних концах направляющих, действуют составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . Полости гидроцилиндров соединены между собой. Перемещению резцодержателей препятствуют силы трения  $F_{tp1}$  и  $F_{tp2}$ .

Динамические особенности процесса функционирования резцодержателей в прямоугольных направляющих рассмотрим с помощью двухмассовой модели системы станок-деталь-инструмент (Рис. 2).

Резцодержатели массой  $m_d$  связаны между собой упругими связями с коэффициентом жесткости  $k_d$  с помощью передаточной функции  $W$ . На резцодержатели действуют радиальные составляющие сил резания  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$ , силы нормального давления  $N_1$  и  $N_2$ , силы трения  $F_{tp1}$  и  $F_{tp2}$ , силы демпфирования с коэффициентом демпфирования  $c_d$ .

Уравнение движения резцодержателей для принятой схемы запишем в виде

$$m\ddot{y}_1 = -P_{y1} - c_d \dot{y}_1 - \frac{k_d}{2} \sum_{i=1}^2 y_i \pm F_{mp1} \quad (1)$$

$$m\ddot{y}_2 = -P_{y2} - c_d \dot{y}_2 - \frac{k_d}{2} \sum_{i=1}^2 y_i \pm F_{mp2},$$

где  $m\ddot{y}$  – приведенные силы инерции системы,  $y$  и  $\dot{y}$  – перемещение и скорость перемещения приведенных масс.

Тангенциальная составляющая силы резания состоит из постоянной  $P_{z0}$  и переменной составляющей  $P_{zi}$

$$P_{zi} = P_{z0} + k_p a \cdot \sin \varphi + \sin \omega \tau, \quad (2)$$

где  $k_p$  – коэффициент резания,  $a = (y_i - y_{0i})$  – величина изменения срезаемого слоя в радиальном направлении,  $\omega$  – угловая частота вращения диска,  $\tau$  – длительность перемещения.

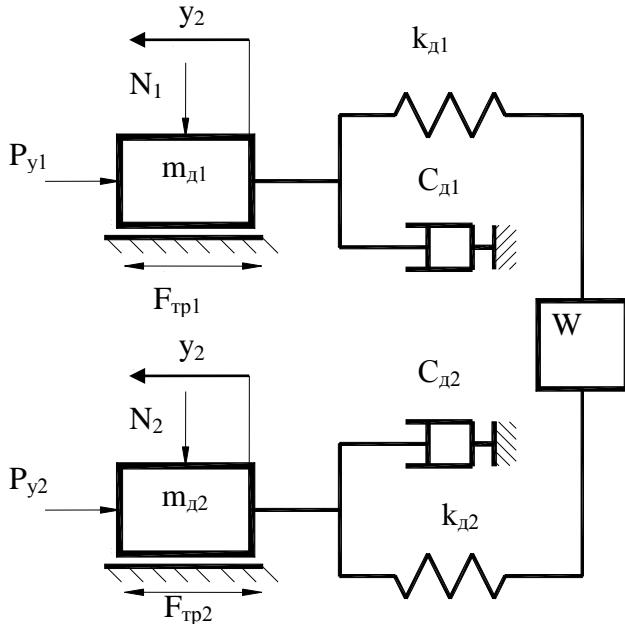


Рис. 2. Структурная расчетная схема движения резцодержателей в направляющих

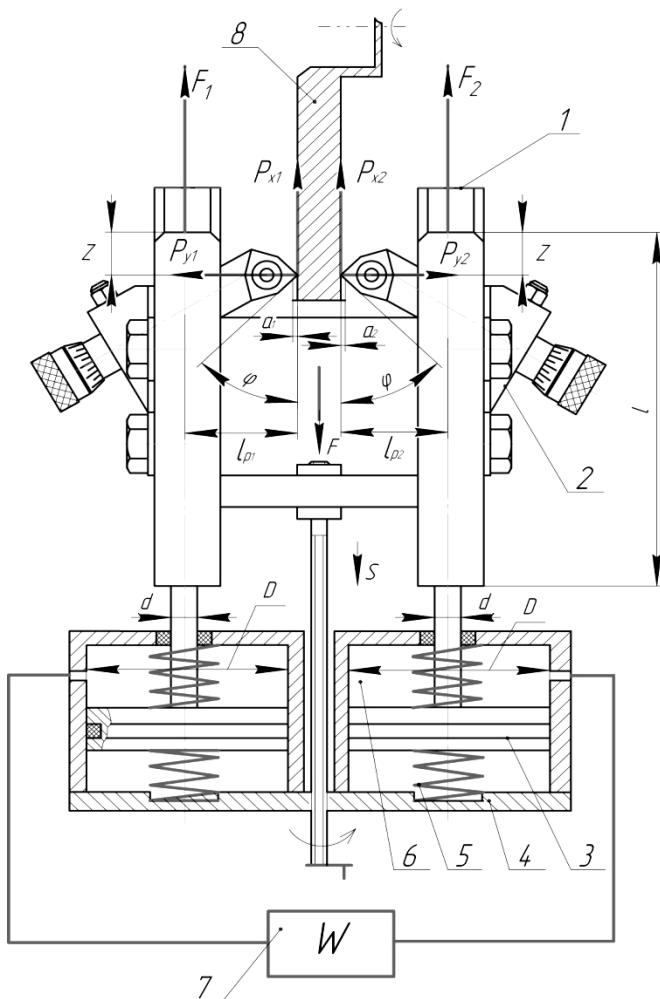


Рис.1 Схема действующих сил в направляющих резцодержателей: 1. Направляющая резцодержателя 2. Резцодержатель 3.Поршень 4. Корпус 5. Пружина 6. Полость 7. Передаточная функция 8. Тормозной диск

Осевая и радиальная составляющая силы соответственно равны:

$$P_{xi} = \mu_{mp} \cos \varphi P_{zi}; \quad (3)$$

$$P_{yi} = \mu_{mp} \sin \varphi P_{zi};$$

где  $\mu_{mp}$  – коэффициент трения,  $\varphi$  - главный угол в плане.

Сила трения при перемещении резцедержателей имеет вид

$$F_{mp1} = \gamma_{nep} N = \gamma_{nep} (P_{zi} + P_{yi}) = \gamma_{nep} (1 + \mu_{mp} \sin \varphi) P_{zi}, \quad (4)$$

где  $\gamma_{nep}$  - коэффициент трения в направляющих при перемещении резцедержателей,  $i = 1, 2$ .

Тогда дифференциальные уравнения примут следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} m \ddot{y}_1 + c_\delta \dot{y}_1 + \frac{k_\delta}{2} (y_1 + y_2) = -\mu_{mp} \sin \varphi (P_{z0} + k_p [(y_1 - y_{10}) \cdot \\ \cdot \sin \varphi] + \sin \omega \tau) \pm F_{mp1}; \\ m \ddot{y}_2 + c_\delta \dot{y}_2 + \frac{k_\delta}{2} (y_1 + y_2) = -\mu_{mp} \sin \varphi (P_{z0} + k_p [(y_1 - y_{20}) \cdot \\ \cdot \sin \varphi] + \sin \omega \tau) \pm F_{mp2}; \end{array} \right. \quad (5)$$

В полученной модели сила трения  $F_{tp}$  может изменять знак плюс на минус. В неподвижном состоянии резцедержателя значение коэффициента трения  $\gamma = \gamma_n$ , а при перемещении резцедержателя с массой  $m_d$  – значение коэффициента трения уменьшается  $\gamma_{nep} < \gamma_n$ .

Направление силы трения изменяется от направления перемещения резцедержателей. Следовательно система уравнений будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{y}_1 + c_\partial \dot{y}_1 + \frac{k_\partial}{2}(y_1 + y_2) = -\mu_{mp} \sin \varphi (P_{z0} + k_p [(y_1 - y_{10}) \cdot \\ \cdot \sin \varphi] + \sin \omega \tau] - F_{mp1}(\dot{y}_1); \\ m\ddot{y}_2 + c_\partial \dot{y}_2 + \frac{k_\partial}{2}(y_1 + y_2) = -\mu_{mp} \sin \varphi (P_{z0} + k_p [(y_1 - y_{20}) \cdot \\ \cdot \sin \varphi] + \sin \omega \tau] - F_{mp2}(\dot{y}_2); \end{array} \right.$$

(6)

Если скорость перемещения  $\dot{y}_1 \neq 0$ , то сила трения

$$F_{mp1}(\dot{y}_1) = F_{mp1} \frac{d}{d\dot{y}_1} |\dot{y}_1|,$$

а при  $\dot{y}_2 \neq 0$  сила трения равна

$$F_{mp2}(\dot{y}_2) = F_{mp2} \frac{d}{d\dot{y}_2} |\dot{y}_2|.$$

Решая систему уравнений (6) по методике предложенной в [4] приходим к выводу, что приблизительной формулой для определения длительности перемещения резцодержателей в направляющих можно принять:

$$\tau_c \approx \frac{\pi}{\omega_x};$$

где  $\omega_x$  – частота собственных колебаний системы.

Величина перемещения резцодержателей в направляющих в этом случае

$$\Delta_c \approx \frac{4\Delta F_{mp}}{k_\partial}$$

Величина осциллирующего перемещения резцодержателя снижает чувствительность функционирования внутренней гидравлической системы стабилизации сил резания, однако с точки зрения повышения вибростойкости и обеспечения

симметричности функционирования наиболее рациональными и технологичными являются прямоугольные направляющие.

**Вывод.** На основе предложенной математической модели динамических особенностей функционирования резцодержателей в прямоугольных направляющих токарного станка для восстановления тормозных дисков определено, что чувствительность функционирования гидравлической системы стабилизации сил резания в значительной степени определяется разностью сил трения в направляющих резцодержателей.

- 
1. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н.Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 303 с.
  2. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1977. – 390с.
  3. Плотников А.Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали: автореф. дис. на соискание научн. степени доктора техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование физико - механической обработки»/ А.Л. Плотников – Саратов, 2001. – 31 с.
  4. Луців І.В. Основи створення багатолезового оснащення з міжінструментальними зв'язками для обробки поверхонь обертання: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.01 / Луців Ігор Володимирович.– Тернопіль, 2006. – 448 с.
  5. Биков В.В. Влияние сил трения на эффективность срабатывания адаптивной системы управления. Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць.- Харків НТУ «ХПІ», - 2010, Випуск 4, С 92-96

**УДК 621.921.048.6**

**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РИСКА СНИЖЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИБРОАБРАЗИВНОЙ  
ОБРАБОТКИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ  
ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА**

*Прокопец Г.А., Прокопец А.А., Дегтярев Е.  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Анализ литературных источников показал, что влиянию человеческого фактора на надежность технологических процессов удалено весьма незначительное количество работ. Однако такая задача назрела. Решение этой задачи потребует значительного количества экспериментальных и теоретических

исследований. Результаты исследований должны обеспечить возможность разработки методики прогнозирования надежности технологического процесса виброабразивной обработки (ТП ВиО) при доминирующей влиянии человеческого фактора. В этом контексте в понятие «Человеческий фактор» включаются не отдельные признаки компонентов системы «человек – машина – процесс», а совокупные качества всей системы.

Влияние человеческого фактора может быть спрогнозировано лишь после идентификации и тщательного анализа потенциальных зон риска (областей значений факторов, провоцирующих отказы), то есть целенаправленного анализа задач системы, функций человека в ней, типа и характера его деятельности. В результате такого анализа можно выявить номенклатуру значимых показателей, характеризующих человеческий фактор, учет которых необходим для стабильного функционирования системы. Можно выделить четыре группы факторов, возникающих при эксплуатации ТП ВиО и связанных с человеческим фактором. К ним относятся: факторы, связанные с ошибочными действиями персонала, обслуживающего технологическую систему ВиО (ТС ВиО); факторы, связанные с техническим состоянием элементов системы (износ оборудования, рабочей среды, своевременность технического обслуживания и проведение профилактических ремонтов и др.); факторы, связанные с взаимодействием системы и окружающей среды (стабильность значимых показательней качества заготовок, поступающих на операцию, утомляемость оператора, квалификация оператора, контролера и т.д.); факторы, связанные с условиями протекания технологического процесса (объем выпуска продукции, степень механизации и автоматизации технологического процесса и др.).

Указанные факторы, безусловно, влияют на стабильность, как одну из двух составляющих надежности, ТП ВиО, и, как показывает накопленный опыт, оказывают значительное влияние в основном в направлении ее снижения, то есть являются факторами риска. Риск напрямую связан с анализом ситуации и принятием решения о состоянии объекта. Принимаемые решения должны отвечать требованиям своевременности, адекватности и выполнимости в конкретных условиях. В противном случае они приводят к дополнительным

материальным затратам или потерям, при этом динамика, масштабы и последствия воздействия реализующегося фактора риска определяются не только начальной ситуацией и физическими принципами ее развития, но и воздействием, осуществляемым при исполнении принятого решения. Количество риска, обусловленный влиянием человеческого фактора, охарактеризуется вероятностью пропуска сигнала об аварийном состоянии объекта.

К основным факторам, влияющим на величину риска снижения стабильности функционирования ТП виброабразивной обработки, можно отнести:

- уровень качества эксплуатации объекта (профессиональная компетентность технолога и оператора);
- срок службы и соответствие состояния объекта заявленным характеристикам. Качество и периодичность контроля технического состояния системы;
- наличие и состояние систем и приборов активного контроля технологического процесса и объекта изготовления;
- объем производства, степень налаженности технологического процесса;
- степень механизации и автоматизации технологического процесса;
- технологические особенности объекта, технологический риск.

Для анализа причин брака можно использовать инженерный подход, который применяется при оценке риска в сложных промышленных технологиях. С его помощью построим дерево отказов технологической системы (ТС) ВиО при виброшлифовании ответственных деталей (рисунок 1).

Появление отказа (шероховатость обработанной поверхности выше допустимой, при этом радиус скругления кромок превышает допустимую величину) может быть обусловлено одной из следующих причин:

- оператор нарушил технологическую дисциплину, либо не обеспечил требуемый режим промывки или заданное время обработки, либо не выполнил вовремя подналадку ТС и др.;
- технолог выбрал неправильную рабочую среду или допустил ошибку при назначении режима обработки, либо не включил в технологический процесс операцию (или переход) по

контролю заготовок, поступающих на обработку (в зависимости от стабильности предшествующей операции или технологического процесса);

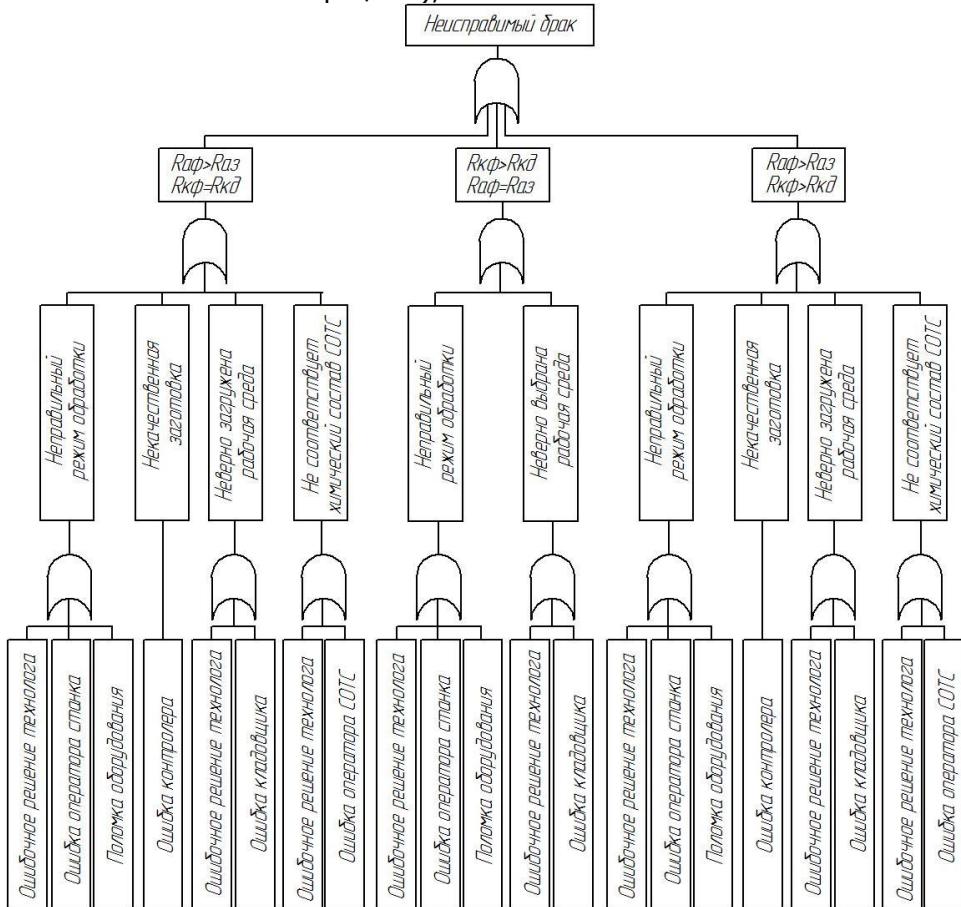


Рисунок 1 – Дерево причин потенциальных отказов (дерево отказов) ТС ВиО при выполнении операции виброшлифования

- контролер допустил ошибку или халатность при входном контроле заготовок, поступающих на операцию ВиО (скрытый брак, не выявленный на предыдущей операции), или при контроле рабочей среды, поступившей на предприятие;

- поломка оборудования, например, в результате несвоевременного профилактического ремонта.

Как показывает анализ дерева отказов, наиболее вероятной причиной отказа является «человеческий фактор».

При выполнении однотипных операций и многократных их повторениях оператор вибростанка быстро накапливает опыт и необходимые знания, то есть происходит процесс самообучения. Опыт в свою очередь позволяет приобрести самостоятельность при анализе внештатных ситуаций, принятии верных решений и, как следствие, снизить влияние факторов риска, обусловленных «человеческим фактором», на стабильность технологического процесса. Требуется меньшее время и меньший объем информации о протекании процесса для принятия правильного решения, то есть возрастает компетентность работника. Анализ априорной информации позволяет выявить характер изменения количества брака от времени выпуска изделия на предприятия.

В общем виде влияние человеческого фактора на стабильность технологического процесса при установившейся технологии можно охарактеризовать комплексным коэффициентом - коэффициентом стабильности по человеческому фактору  $K_{ч.ст.}$  (вероятностью не наступления рискового события):

$$K_{ч.ст.} = K_y \cdot K_{KO} \cdot K_{СЛ} \cdot K_P \cdot K_{TD} \cdot K_A$$

Рассмотрим составляющие, вошедшие в эту зависимость.

Коэффициент, характеризующий утомляемость оператора  $K_y$ , является величиной переменной и является функцией времени  $t$ :

$$K_y = A \cdot f(t) = A \cdot \varphi(t) \cdot g(t),$$

где  $A$  – величина, определяемая влиянием элементов фактора утомляемости человека на величину брака, не зависящих от времени работы (например состояние здоровья человека, механизация процесса и др.);  $\varphi(t)$  - функция, описывающая изменение влияния утомляемости рабочего на количество брака в течение рабочей смены;  $g(t)$  - функция,

описывающая изменение влияние утомляемости рабочего на количество брака в течение рабочей недели.

Коэффициент, учитывающий квалификацию и степень подготовленности оператора  $K_{ко}$ . Он в немалой степени характеризует работу руководящего органа по правильному подбору и обучению кадров, снижению их текучести. Коэффициент, характеризующий степень сложности процесса  $K_{сл.}$ , учитывает в первую очередь правильность работы технологов, проектирующих операции ВиО, и наладчиков ТС . Коэффициент, зависящий от размера и повторяемости партий запуска обрабатываемых деталей  $K_p$ , определяется тем опытом, который приобретают и наладчик, и оператор вибрационного станка при многократном повторении технологических операций. Коэффициент соблюдения технологической дисциплины  $K_{тд}$ , определяется в первую очередь правильной организацией контроля и корректной системой материального и морального стимулирования работников. Коэффициент, характеризующий степень автоматизации технологического процесса  $K_A$ , определяется степенью участия человека в непосредственном протекании технологического процесса. Диапазон изменения всех коэффициентов заключается между единицей, когда условия процесса по этому параметру являются оптимальными, и нулем при наиболее неблагоприятных условиях. Однако принятие коэффициентами этих предельных значений маловероятно.

Необходимо отметить, что соотношение технологической и человеческой составляющей в причинах брака может сильно различаться даже в условиях одного структурного подразделения предприятия, одного рабочего места в разные смены и для разных деталей (например, при упрочняющей обработке одних деталей или отделочной обработке поверхностей других наименований деталей, при удалении заусенцев или очистке от окалины). На это соотношение может оказывать влияние и качество поступающих заготовок, и требования к обрабатываемым поверхностям, и организация рабочего места (например, освещенность, эргonomичность и др.), и даже день недели, не говоря уже о времени смены. В условиях низкого уровня автоматизации производства доля человеческого фактора в причинах брака нередко становится

доминирующей. Поэтому достаточно высокий уровень брака при отсутствии или малой механизации процесса не может считаться однозначным показателем плохо спроектированной технологии и или плохого состояния оборудования.

Автоматизация и механизация технологического процесса позволяет с одной стороны уменьшить степень участия человека в технологическом процессе, уменьшить утомляемость, с другой – требует более высокой квалификации обслуживающего персонала, в том числе наладчиков, и исключает возможность выполнения оператором функций наладчика.

Проведенный анализ позволил выявить факторы риска, приводящие к снижению надежности процесса ВиО, обусловленные влиянием человеческого фактора. Можно указать наиболее вероятные «внутренние» причины снижения надежности ТП ВиО:

- недостаточная степень механизации и автоматизации технологического процесса;
- недостаточная теоретическая подготовка кадров;
- недостаточный опыт эксплуатации, обслуживания, ремонта элементов ТС ; отсутствие навыков предсказания аварийных ситуаций;
- отсутствие проверки профпригодности оператора, допускаемого к обслуживанию вибростанков;
- повышенная утомляемость, вызываемая вибрациями и повышенным уровнем шума, физическими нагрузками, а также связанная с нерациональными действиями, излишней напряженностью, связанной с неумением работника анализировать и прогнозировать ситуации и др.

Основными путями снижения влияния человеческого фактора на надежность технологического процесса являются следующие:

- повышение степени механизации и автоматизации ТП ВиО;
- разработка и внедрение систем контроля за стабильностью протекания технологического процесса, а также систем адаптивного управления;
- периодическая переаттестация и обучение обслуживающего персонала;

- тщательный контроль соблюдения технологической дисциплины;
- сбор, анализ, систематизация сведений по причинам и механизмам возникновения аварийных и внештатных ситуаций, зависящим от обслуживающего персонала и выработка мероприятий по их устранению;
- соблюдение требований техники безопасности и охраны труда;
- применение средств индивидуальной и коллективной защиты для снижения утомляемости и концентрации внимания к концу рабочего дня и др.

- 
1. Репях С.И. О влиянии человеческого фактора на качество отливок в литье по выплавляемым моделям. Ж.: Библиотечка литейщика, 2006, №8. Изд. дом «Литейное производство»
  2. Аствацатуров А.Е. и др. Инженерно-психологические оценки надежности систем «Человек-машина». «Надежность машин и технологического оборудования»: Тез. Докл. Междунар. Научно-технич. конф. ДГТУ, г. Ростов н/Д, 1994, с.221-222
  3. Аствацатуров А.Е. и др. Эргономическое обеспечение надежности систем «человек-машина-среда». Тез. Докл. Междунар. Научно-технич. конф. ДГТУ, г. Ростов н/Д, 1994, с.219-220.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЁННОГО МЕТОДОМ ЭЛАН**

*Самосудов А.П., Анисимов В.Н., Аль-Тибби В.Х., Поздняков А.Г.  
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Направленное изменение свойств покрытий путем варьирования их составом, структурой и строением позволяет существенно изменять контактные характеристики процесса резания. Появляется возможность управления динамической характеристикой резания и важнейшими выходными параметрами процесса резания – производительностью, стойкостью и надежностью, а также качеством и точностью обработанных деталей.

Метод электроакустического напыления (ЭЛАН) применяется для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент и поверхности трения [1]. В основе метода ЭЛАН лежит использование высококонцентрированных потоков

энергии электрической искры и продольно-крутильных ультразвуковых колебаний.

Необходимо отметить, что износостойкое покрытие существенно изменяет характеристики динамической связи, поскольку соответственно существенно изменяются процессы контактного взаимодействия.

Режущий инструмент в процессе резания подвергается комплексному воздействию силовых, тепловых и механотермических процессов, которые находят свое отражение в силовых, вибраакустических и температурных характеристиках процесса резания.

Анализ исследований в области диагностики процесса резания и состояния инструмента показывает, что наиболее информативными и чувствительными параметрами, характеризующими состояние процесса резания, а следовательно, состояние инструмента и его эволюционные изменения является сигнал вибраакустической эмиссии (ВАЭ) и тока ТЭДС. Сигнал ВАЭ является одним из информационных параметров, позволяющих оценить качество поверхностного слоя упрочняющего покрытия.

Существующее представление о динамических процессах в контактной области «инструмент-деталь» при обработке инструментом с износостойким покрытием [2] показывает существенное влияние свойства покрытия на характеристики контактной области. При этом очевидно влияние свойств покрытия на динамические свойства контакта “упрочненный инструмент - деталь”, а следовательно на динамическую характеристику резания при обработке инструментом с упрочненным покрытием, которое до настоящего времени не рассматривалось.

С целью выявления качественной зависимости информативных сигналов, характеризующих динамические свойства контактной области вибраакустической эмиссии и тока ТЭДС, был проведен ряд экспериментов.

В ходе экспериментов проводился сравнительный анализ параметров вибраакустического сигнала и тока ТЭДС при обработке инструментами из быстрорежущей стали Р6М5 и инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 с упрочненным

износостойким покрытием из сплава ВК6, нанесенным по методу ЭЛАН.

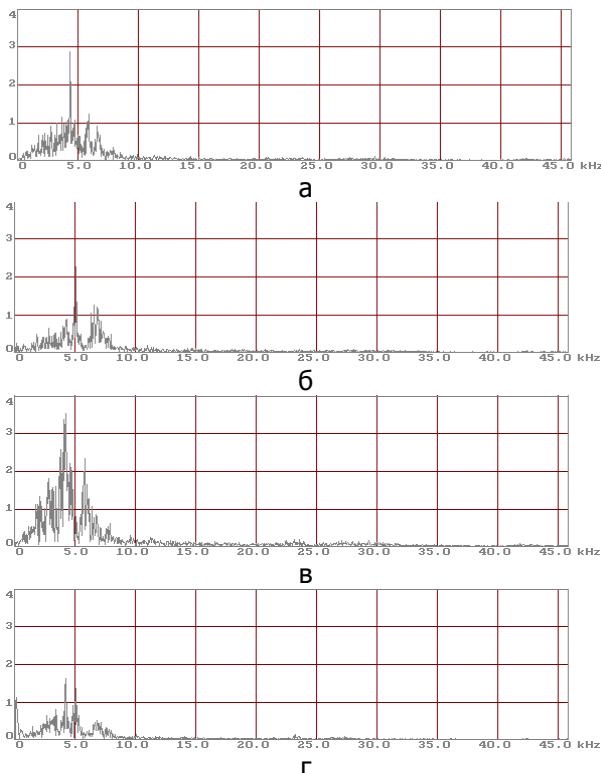
В ходе эксперимента наблюдались последовательности сигналов ВАЭ в трех ортогонально направленных плоскостях и временные последовательности тока ТЭДС. В качестве первичных преобразователей использовались пьезоакселерометры ДН-4-М1, установленные по трем координатным плоскостям непосредственно на державке резца. Вибраакустический сигнал подвергался предварительному усилению и фильтрации пассивным фильтром с частотой среза 45 кГц.

Временные реализации тока ТЭДС были получены на специальном стенде по методике [3]. Сущность метода заключается в возникновении тока ТЭДС в замкнутом контуре «инструмент – деталь – шпиндель –измерительная обмотка» величина которого обусловлена фактической площадью контакта «инструмент-деталь». Сигнал, пропорциональный току ТЭДС, снимался через специальный токосъёмник и возбуждал переменное магнитное поле в измерительной обмотке. Амплитудно-модулированный сигнал воспринимался вторичными обмотками, затем усиливался, фильтровался, детектировался и далее поступал в информационно-измерительную систему. Ток ТЭДС является высокочувствительным информативным параметром, в частности, постоянная составляющая тока ТЭДС несет информацию о средней температуре в зоне резания, а переменная о динамических процессах в зоне резания. Уровень переменной составляющей тока ТЭДС несет информацию об интенсивности колебательных процессов в зоне обработки.

Полученные данные носят качественный характер и позволяют сравнивать свойства динамического контакта исключительно для данных условий обработки. В ходе эксперимента обрабатывались заготовки из разных материалов (сталь 45, сталь 35ХГСА, сталь 60, серый чугун, бронза, алюминий), значения частоты вращения шпинделя устанавливались равными 100 об/мин и 250 об/мин.

Полученные временные реализации сигнала ВАЭ, после статистического усреднения в программе Mathcad, были подвергнуты спектральному анализу. Спектры ВАЭ для различных условий обработки представлены на рис. 1.

Сравнительный анализ спектральных характеристик показывает выделение максимальной энергии сигнала в частотном диапазоне от 0 до 10 кГц для всех случаев обработки. При этом, для всех материалов (сталь 45, сталь 35ХГСА, сталь 60, серый чугун, бронза, алюминий), на всех режимах резания (100 об/мин и 250 об/мин) было отмечено уменьшение средне - квадратичного значения спектральной плотности энергии ВА сигнала у упрочненного резца на 30% по сравнению с неупрочненным резцом. Данное утверждение справедливо и для отдельных составляющих спектра. Кроме того, было отмечено смещение спектральных составляющих в высокочастотную область для инструмента с покрытием.



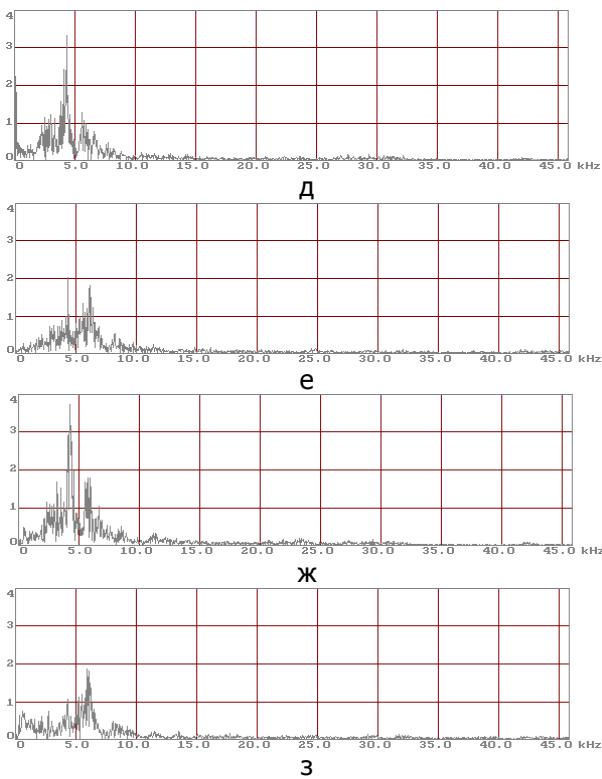


Рисунок 1 – Спектры ВА сигнала при обработке инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения (а, в, д, ж) и с упрочнением (б, г, е, з) соответственно при точении стали 60, серого чугуна, стали 45, стали 35ХГСА для скоростей резания 28,45 м/мин (а, б, в, г) и 71,1 м/мин (д, е, ж, з).

Однако, уже на данном этапе можно говорить о существенном снижении энергии вибрационного сигнала при обработке инструментом с упрочненным покрытием, что подтверждает результаты работы [3], в которой отмечается уменьшение значений характеристик контактной области, зоны главных и вторичных деформаций, длины контакта по передней поверхности, угла сдвига, сил резания, коэффициента и силы трения.

Анализ временных последовательностей тока ТЭДС выявил неоднозначную картину. В частности, было отмечено уменьшение переменной и постоянной составляющей тока ТЭДС при обработке стали 45, стали 35ХГСА, стали 60 в среднем примерно на 30% (таблица 1).

Таблица 1

Параметры тока ТЭДС для различных условий обработки

Ток ТЭДС			Сталь 45	Сталь 35ХГС А	Сталь 60	Серый чугун	Бронза
Материал заготовки	Скорость резания м/мин	Ток ТЭД С					
Р6М5	28,45	перем.	0,8	0,5	0,7	0,3	0,8
		пост.	1,2	1,0	1,2	0,74	1,4
	71,1	перем.	1,4	0,8	1,2	0,5	1,6
		пост.	1,6	1,1	1,3	0,8	1,8
Р6М5 ВК6 – ЭЛАН	28,45	перем.	1,2	0,7	0,8	0,5	1,2
		пост.	1,4	1,2	1,0	0,8	1,4
	71,1	перем.	1,8	1,2	1,4	-	-
		пост.	1,8	1,3	1,6	-	-

При обработке пластичных материалов, в частности алюминия, бронзы величина тока ТЭДС для обеих видов инструментов остается практически неизменной. Однако были получены данные, анализ которых показал повышение тока

ТЭДС для упрочненного инструмента по сравнению с неупрочненным. По-видимому, это объясняется тем, что микровпадины передней упрочненной поверхности при точении вязких материалов заполняются «квазивязкими» фрагментами обрабатываемого металла. При этом увеличивается фактическая площадь контакта, что приводит к уменьшению переходного сопротивления и увеличению тока ТЭДС.

Полученные результаты показывают существенное влияние свойств упрочняющего износостойкого покрытия на динамические характеристики процесса резания и возможность анализа обрабатываемости, состояния процесса резания и инструмента.

- 
1. Минаков В.С. Разработка комплексных механических и электрофизических процессов обработки на основе использования энергии трансформируемых ультразвуковых колебаний. Дис. д-ра техн. наук - Ростов н/Д, 1989.
  2. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
  3. Отаров С. К., Палагнюк Г. Г. Многофункциональная диагностика и оптимизация процесса токарной обработки на основе микропроцессорной системы управления// Диагностика и управление в технических системах: Сб. науч. тр. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 1998. – 78 - 87 с.

## **УДК 621.9.015**

### **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ УСТРОЙСТВ С БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДОЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Лебедев В.А. Иванов В.В., Серга Г.В.*

ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, «Кубанский ГАУ», г. Краснодар,  
Россия

Возможность создания низкочастотных колебаний с большой амплитудой колебаний от 10-500 мм и более при выполнении отделочно-зачистной обработки деталей может реализоваться за счет оформления наружных поверхностей барабана, дискретно расположеными по периметру плоскими элементами различной формы и типоразмеров

разнонаправленных по отношению в винтовым линиям по их наружной поверхности. Такие барабаны названы нами винтовыми барабанами. Предлагается нами на базе винтового барабана с взаимонаправленными по периметру винтовыми линиями равного шага устройство для отделочно-зачистной обработки [1].

Предлагаемое устройство для отделочно-зачистной обработки состоит из станины 1, выполненной в виде сварной рамы (рисунок 1).

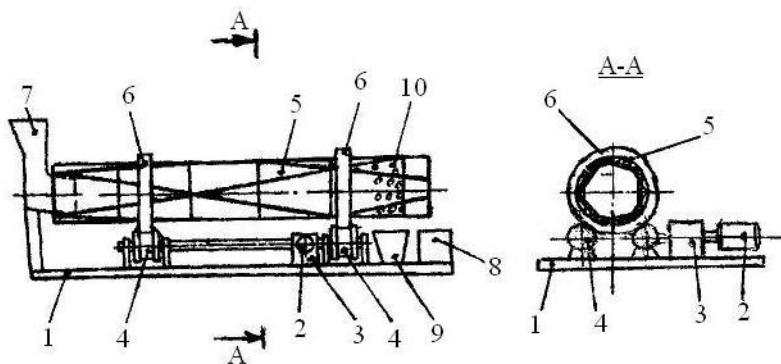


Рисунок 1- Общий вид устройства для отделочно-зачистной обработки

На станине закреплен привод главного движения, состоящий из электродвигателя 2, редуктора 3 и четырех роликовых опор 4. Винтовой барабан 5 снабжен двумя ободами 6, которые опираются на роликовые с ребордами опоры 4. На станине 1 смонтировано средство для загрузки 7 и разгрузки 8, а также бункер 9 для отходов. Над бункером 9 в барабане 5 выполнены отверстия 10 для удаления отходов (облой, металл заусенцев, окалины и т.п.)

Винтовой барабан 5 (рисунок 2) изготовлен из секций 11, смонтированных из двух подсекций, например 12 и 13 выполненных из трех

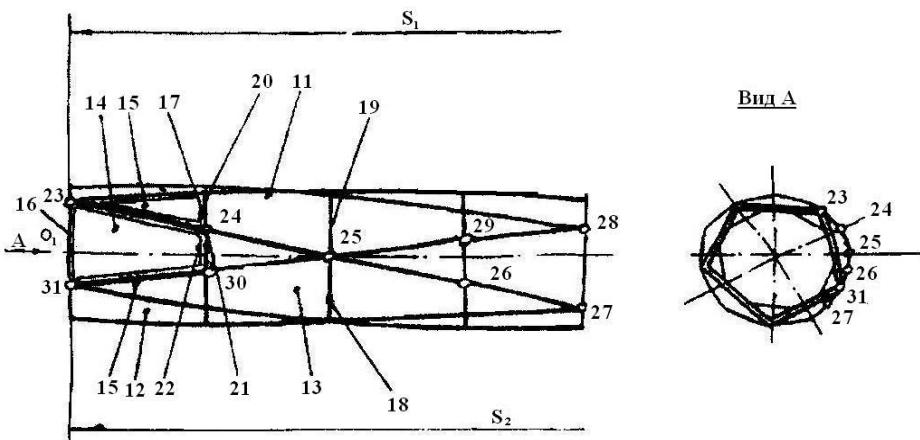


Рисунок 2- Винтовой барабана, общий вид

и более поочередно соединенных между собой боковыми сторонами равнобедренных трапеций 14 и равнобедренных треугольников 15 (на рисунке 2 одна из равнобедренных трапеций 14 и один из равнобедренных треугольников 15 выделены двойными линиями), основания которых в подсекции, например подсекции 12, расположены в разные стороны. Например в подсекции 12 основание 16 трапеции 14 и основание 17 треугольника 15 расположены в разные стороны подсекции, при этом секции соединены между собой большими основаниями трапеций 18, 19, например как на рисунке 2, а подсекции соединены в секцию так, что основания равнобедренных треугольников, например, одной подсекции 12 основания 17 присоединены к верхнему основанию, например 20 равнобедренных трапеций второй подсекции 13, а основания равнобедренных треугольников второй подсекции, например, подсекции 13 основание 21 присоединены к верхнему основанию 22 равнобедренных трапеций, например 14 первой подсекции 12 (рисунок 3).

В результате такой последовательной сборки элементов стенок винтового барабана 5, по периметру образуются, например, на рисунке 2, пять правых и пять левых ломанных винтовых линий с одинаковым шагом  $S_1$  и  $S_2$ . Одна из пяти

левых ломанных винтовых линий с шагом  $S_1$  показана на фиг. 2 утолщенной линией 23-24-25-26-27, а одна из пяти правых ломанных винтовых линий с шагом  $S_2$  показана на рисунке 2 утолщенной линией 28-29-25-30-31.

Предлагаемое устройство для отделочно-зачистной обработки работает следующим образом.

Во вращающийся винтовой барабан 5 устройства для отделочно-зачистной обработки через средство для загрузки 7 беспрерывно загружается рабочая среда и подлежащие обработке детали. При вращении барабана 5 рабочая среда и обрабатываемые детали совершают движение по винтовым канавкам и выгружаются из барабана 5 в средство 8. Отходы обработки (облой, материало-заусенцев, окалина и т.п.) через отверстия 10 выводятся из барабана 5 в бункер отходов 9.

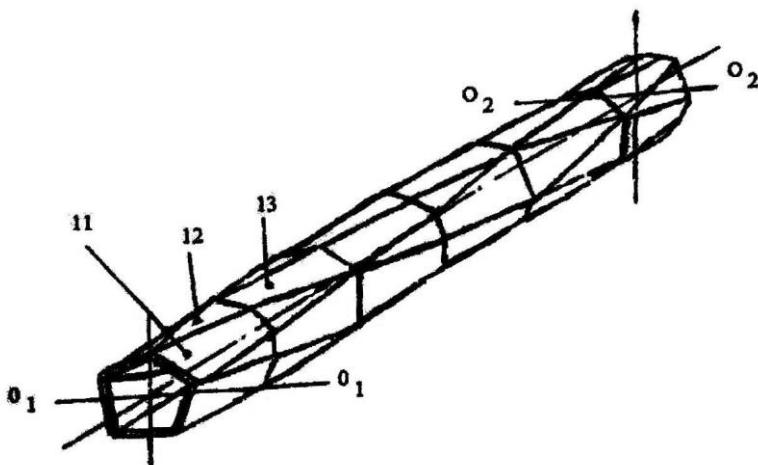


Рисунок 3 – Наглядное изображение винтового барабана

Таким образом, при вращении винтового барабана 5 частицы абразивных сред и обрабатываемые детали захватываются внутренней винтовой поверхностью, и в направлении вращения поднимаются вверх и перемещаются в сторону выгрузки. По достижении определенной высоты под действием гравитационных сил и образовавшегося угла

естественного откоса частицы абразивных сред и обрабатываемые детали движутся навстречу друг к другу под определенными углами и к стенкам вращающегося винтового барабана 5 и перемещается в сторону выгрузки. Так как поверхность винтового барабана 5 непрерывна, то и непрерывен процесс движения последующих порций обрабатываемых деталей и абразивных материалов, которые поднимаются вверх и падают вниз, движутся под разными углами. Поскольку плоские элементы внутренней поверхности винтового барабана 5 расположены под углом друг к другу, то каждая порция частиц абразивных материалов и обрабатываемых деталей перемещаются по своему вектору направления в сторону выгрузки, что в значительной степени интенсифицирует процесс взаимодействия абразивных материалов и обрабатываемых деталей друг с другом и со стенками барабана 5, повышает интенсивность обработки деталей и расширяет технологические возможности. В результате такой конструкции винтового барабана 5 значительно расширен диапазон изменений результирующих векторов перемещений частиц абразивных материалов и обрабатываемых деталей и поэтому каждая абразивная частица и обрабатываемая деталь движутся по разным векторам направления, что обеспечивает большую вероятность столкновений в начальный момент отрыва их от стенок барабана 5, где они обладают определенным запасом кинетической энергии и движутся с большой кинетической энергией, поэтому и обеспечивается интенсификация процесса обработки деталей.

Технико-экономические преимущества возникают за счет расширения диапазона изменений результирующих векторов перемещений абразивных частиц и обрабатываемых деталей, повышения интенсивности их смешивания и переориентации, а также увеличения скорости их перемещений от загрузки к выгрузке, что повышает интенсивность смешивания, увеличивает энергоемкость взаимодействия абразивных частиц и обрабатываемых деталей (далее сыпучие материалы) друг с другом и со стенками винтового барабана барабана 5, повышает производительность, расширяет технологические возможности. Проведены экспериментальные исследования движения сыпучих

материалов в винтовом барабане с использованием планирования трехфакторного эксперимента по Вк плану.

После математической обработки экспериментальных данных получили следующие уравнения регрессии для скорости перемещения сыпучих веществ в винтовом барабане:

$$\begin{aligned} Y = & 61,079 + 9,067 \cdot x_1 + 105,715 \cdot x_2 + \\ & + 13,144 \cdot x_1 \cdot x_2 - 44,238 \cdot x_1^2 + 74,325 \cdot x_2^2 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Y$  – скорость перемещения, мм/с.

Продифференцировав уравнение по каждой из переменных и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений.

$$\begin{aligned} 2b_{11}x_1 + b_{12}x_2 &= -b_1 \\ b_{12}x_1 + 2b_{22}x_2 &= -b_2 \end{aligned}$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика:

$$\begin{aligned} x_1 &= -0,000313 \\ x_2 &= -0,71089 \end{aligned}$$

Подставив в исходное уравнение (1) значения  $x_1$ ,  $x_2$  находили значения параметра оптимизации в центре поверхности отклика.

При этом получили  $Y_s = 23,49$  мм/с.

Где  $Y_s$  – значение отклика в новом начале координат (свободный член канонического уравнения).

Определили угол поворота осей координат поверхности отклика (старых осей) до совмещения с главными осями фигуры.

Угол поворота осей равен  $-3,16$  градусов, так как уравнение (2) не имеет парных взаимодействий, а коэффициент регрессии в канонической форме равен:  $B_{11} = -44,6$ ,  $B_{22} = 74,69$ .

Уравнение регрессии в канонической форме будет иметь вид

$$Y - 23,49 = -44,6 \cdot X_1^2 + 74,69 \cdot X_2^2, \quad (2)$$

или:

$$\frac{(X_1)^2}{Y - 23,49} + \frac{(X_2)^2}{Y - 23,49} = 1 \quad (3)$$
$$\frac{-44,6}{74,69}$$

Поверхность отклика - гиперболоид, а ее центр - минимакс, поскольку коэффициенты  $B_{11}$  и  $B_{22}$  имеют разные знаки, которая представлена на рис.4 Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении 2).

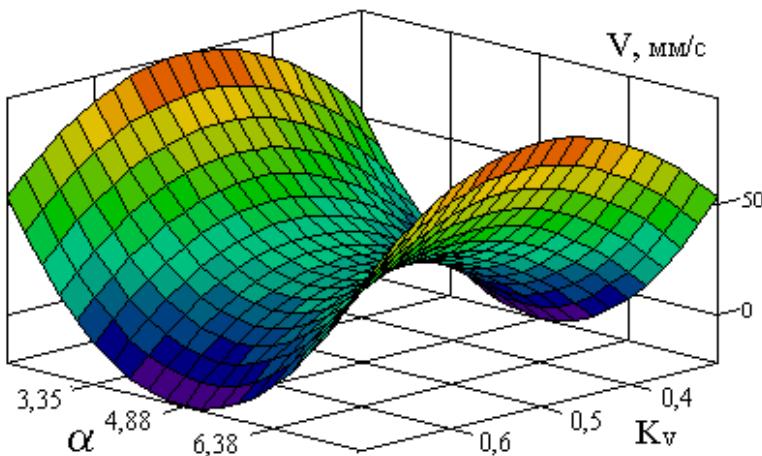


Рисунок 4 – Поверхность зависимости скорости перемещения сыпучих тел в винтовом барабане от коэффициента заполнения и угла его наклона

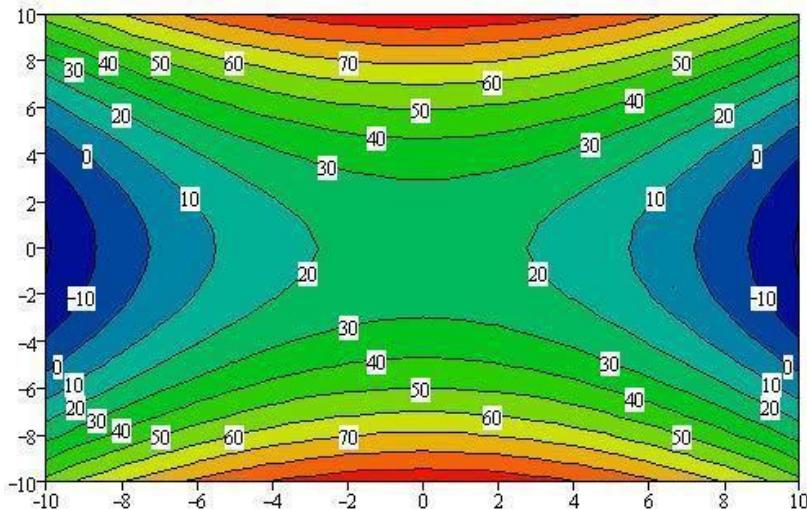


Рисунок 5 – Двумерное сечение зависимости скорости перемещения сыпучих тел в винтовом барабане от коэффициента заполнения и угла наклона

Рассмотрим двумерное сечение плоскостью (рисунок 5). Расположение элементов скорости перемещения в области эксперимента напоминало поверхность типа «Сходящихся гребней». Из рисунка 5 можно сделать вывод, что изменение значения  $x_1$  в пределах эксперимента влияет на скорости перемещения по закону параболы, т.е. с увеличением коэффициента заполнения от центра плана скорость перемещения падает, а при увеличении значения угла наклона винтового барабана ( $x_2$ ) скорость перемещения возрастает.

По результатам исследований можно сделать выводы:

1. С использованием планирования трехфакторного эксперимента по Вк плану определены оптимальные режимы работы винтового барабана при условии выполнения исходных требований к качеству обработки. Согласно полученному уравнению регрессии для данного примера по критерию максимальной скорости перемещения частиц сыпучих

материалов равным 23,49 мм/с, оптимальный коэффициент заполнения винтового барабана составил 0,499, а минимальный угол его наклона, при котором будет обеспечиваться устойчивый рабочий процесс равен 4,88 градуса.

2. С увеличением угла наклона винтового барабана, скорость перемещения сыпучих материалов возрастает.

---

1. Пат. № 2507053 Российская Федерация. Заявка 23.11.2012. № 2012150229/02. Опубл. 20.02.2014. Бюл. № 5. 11с. Устройство для отделочно-зачистной обработки / Г.В. Серга, В.А.Лебедев, В.В.Иванов; заявитель и патентообладатель КубГАУ.

2. Лебедев В.А. Интенсификация отделочно-упрочняющей обработки в винтовых барабанах путем последовательного уплотнения и разряжения массы загрузки / В.А.Лебедев В.В., Н.Н.Кузнецова, Серга Г.В. // Межвуз. сб. научн. ст./ Донской Гос. Тех. Университет. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – С214-231.

3. Решение о выдаче патента на изобретение «Станок для химико-отделочно-упрочняющей обработки деталей». Серга Г.В., Иванов В.В., Лебедев В.А. Решение от 04.03.2014. Заявка 2013106597/02(0097800), подано: 14.02.2013.

## **УДК 621.9.048.6:621.794**

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО ПОКРЫТИЙ MOS<sub>2</sub>**

*Иванов В.В., Полов С.Н., Марченко Э.В.  
ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

В современной специальной литературе повышению конкурентоспособности машин и агрегатов уделяют должное внимание, разработка и внедрение в производство практических, высокоэффективных технологических процессов, обеспечивающих высокое качество, эксплуатационные свойства и товарный вид выпускаемой продукции является одним из приоритетных направлений прикладной науки.

Важным условием решения этих задач является совершенствование и развитие финишных методов обработки и нанесения покрытий.

Одним из эффективных способов обработки, позволяющих комбинировать процессы виброотделки деталей с одновременным нанесением на них покрытий, является вибрационная обработка.

Предметом наших исследований являются твердосмазочное покрытие  $\text{MoS}_2$ , формируемое на поверхности детали в условиях виброволнового воздействия свободнодвижущимися инденторами. Интерес многих исследователей к твердосмазочным покрытиям на основе дисульфида молибдена, обусловлен его уникальными свойствами, которые способствуют повышению износостойкости ответственных деталей, входящих в пары трения различных изделий. Дисульфид молибдена имеет гексагональную слоистую решетку в форме призматического шестигранника (рис.1). Такое строение кристаллической решетки  $\text{MoS}_2$  обеспечивает наличие важных для смазочных материалов высоких адгезионных свойств.

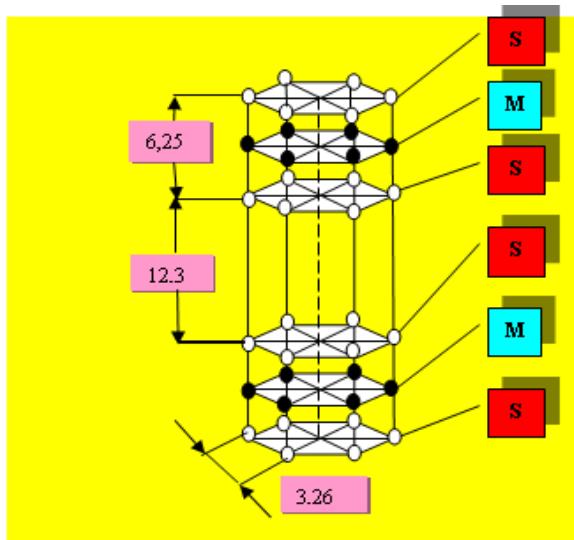


Рисунок 1 – Кристаллическая решетка дисульфида молибдена

Дисульфид молибдена обладает слоистой структурой, в которой есть «прочные» и «плотные» слои, в достаточно большой степени удаленные друг от друга. При этом в слое,

покрывающем поверхность трения, имеются сильные связи, тогда как связь между слоями слабые. Такие скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, существенно снижая коэффициент трения и изнашивания пары трения. Высокая адгезия дисульфида молибдена к металлам обусловлена прочными молекулярными связями, образуемыми атомами серы с металлом [2].

**Исследование качества и эксплуатационных свойств вибрационных твердосмазочных покрытий  $\text{MoS}_2$ .** Исследования характеристик проводились на машине трения СМЦ-2, потандартной методике. Результаты исследований представлены на (рис. 2, 3, 4, 5).

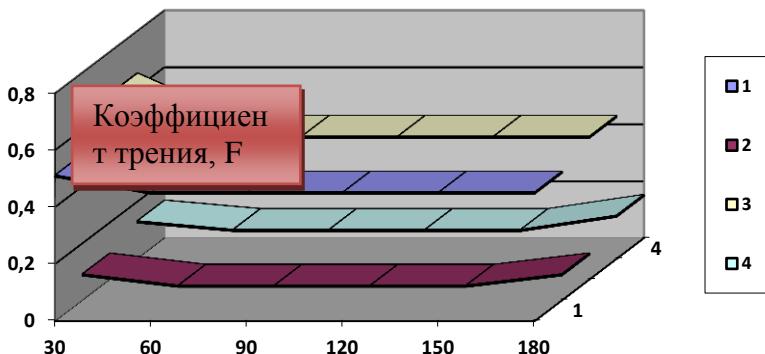


Рисунок 2 – Исследование коэффициента трения пар:  
1 – ШХ15-40Х – исходные; 2 – ШХ15 – покрытие  $\text{MoS}_2$ -40Х – исходные;  
3 – 40Х – чугун СЧ21-40-исходные;  
4 – 40Х – покрытие  $\text{MoS}_2$  – чугун СЧ21-40 – исходные.

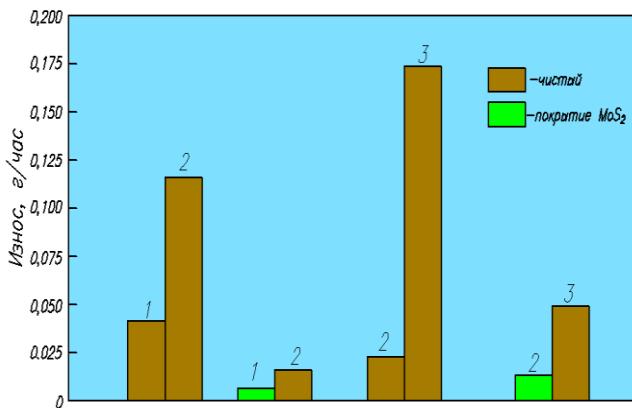


Рисунок 3 – Исследование износостойкости пар трения образцов:  
1 – сталь ШХ15; 2 – сталь 40Х ;3 – чугун СЧ21-40.

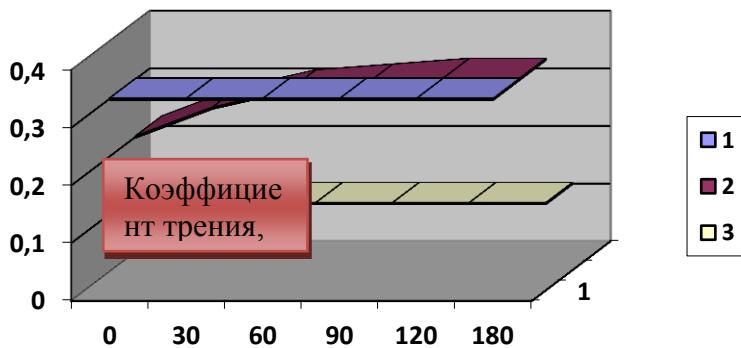


Рисунок 4 – Результаты испытаний образцов из титановых сплавов ВТ-20 при трении качения с 20%-ым проскальзыванием, нагрузке 40кГ( $q=900\text{kG}/\text{см}$ ) – при комнатной температуре, без смазки;  
1 – исходные; 2 – виброупрочненные; 3 – покрытые MoS<sub>2</sub>

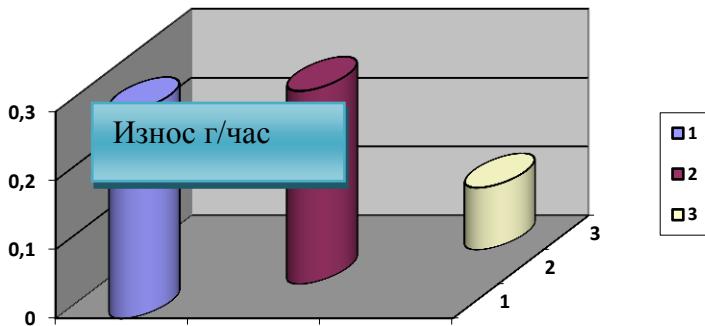


Рисунок 5 – Износостойкость пар трения образцов из сплава ВТ-20 и сталь 1Х12Н2ВМФ; 1 – исходные; 2 – виброупрочненные; 3 – покрытые MoS<sub>2</sub>

Результаты проводимых исследований показали, что полученное в процессе виброволнового воздействия твердосмазочное покрытие MoS<sub>2</sub> приводит к снижению коэффициента трения и повышению износостойкости пар трения при работе не только в воздушной среде, но и в среде масла. Износ при работе в течение 3-х часов практически не отмечен. Экспериментально подтверждено, что наличие слоев различных атомов в структуре дисульфида молибдена создает условия легкого скольжения.

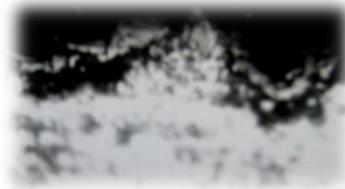
Большое влияния на антифрикционные свойства покрытия оказывает наноразмерность и ориентация его частиц, а также нанорельеф поверхности основы. В процессе формирования покрытия дисульфида молибдена в условиях виброволнового воздействия обеспечивается ориентация частиц базовыми плоскостями параллельно плоскости скольжения и процесс приработки покрытия в этом случае практически отсутствует[1].

В зависимости от условий эксплуатации и материала пар трения снижение коэффициента трения достигает от 3-х до 9-х раз, а увеличение их износостойкости от 4-х до 20-и раз.

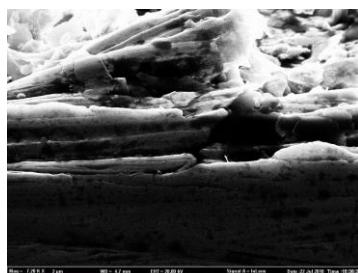
С целью более глубокого исследования поверхности использовался электронный микроскоп SUPRA25, позволяющий изучать поверхность металла, материал покрытия, вести непрерывный контроль процесса, электронно-лучевую

литографию, и наблюдение материалов с ультра малыми размерами (нм). Исследования поверхностного слоя проводили на сканирующим зондовым микроскопе Nanoeducator (NT-MDT), нанопрофиль поверхности на туннельном микроскопе PHYWE.

На (рис. 6,7.) представлена серия фотографий, иллюстрируемых состояние поверхности образца из Ст 45 и порошка MoS<sub>2</sub> в исходном состоянии и после нанесения покрытия MoS<sub>2</sub>. Снимки произведены с различным увеличением и с различных позиций (изменением наклона предметного стола). Адсорбированные частицы твердой смазки не имеют определенной ориентации (рис. 6 а), но в зоне контакта, благодаря сближению и скользящим ударам индентора, частицы ориентируются базовыми плоскостями параллельно обрабатываемой поверхности, о чем говорят блестящие участки на поверхности покрытия, хорошо видимые на микрофотографии (рис.6 б).



а)



б)

Рис. 6. Поверхность микрошлифа Ст 45 (HRC 28) с внедренными частицами порошка MoS<sub>2</sub>, × 500 а), б) получены на аналитическом автоэмиссионном электронном микроскопе Zeiss SUPRA25 масштаб 2 мкм.

Полученные фотографии дают наглядное представление о характере рельефа покрываемой поверхности и твердосмазочного покрытия, раскрывают механизм образования при механическом (виброударном) воздействии в среде стальных инденторов диаметром 3...5 мм и её влияние на бинарную смесь и порошок дисульфида молибдена. На (рис. 7 а) четко видны параллельные линии на металле оставленные после механической обработки /3/. На (рис. 7 б) видны размеры и расположение порошка (хаотичное). После нанесения покрытия (рис. 7 в) механически было удалено часть порошка таким образом образовалась четкая граница металл – покрытие отчетливо видная на фотографии, что дало возможность увидеть боковой шлиф, который подтвердил ориентацию частиц  $\text{MoS}_2$  относительно вращения детали. Кроме того в результате проведенных исследований установлено, что образуемый в процессе вибрационной обработки слой твердой смазки дисульфида молибдена, покрывается тонкой пленкой имеющей ориентацию частиц базовыми плоскостями параллельно поверхности трения (рис. 7 г).



(а)



(б)



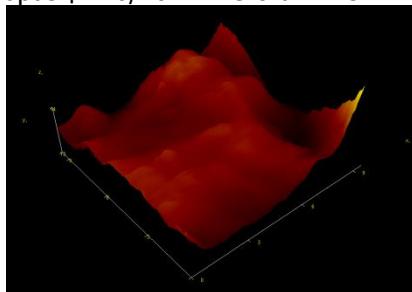
(в)



(г)

Рис.7. Морфология поверхности;(а) – Исходный образец Ст 45,(б) – Порошок MoS<sub>2</sub>, в- граница покрытие дисульфид молибдена металл, г- покрытие дисульфид молибдена приработанное масштаб-200 нм.

Исследования микро/нанопрофиля поверхности проводились на базе (МРЦКП ДГТУ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Nanoeducator (NT-MDT), результаты представлены на (рис.8,9,10). В качестве исходной поверхности удовлетворяющей требованиям оборудования использовались шлифованные образцы 10/10 мм из стали 45.



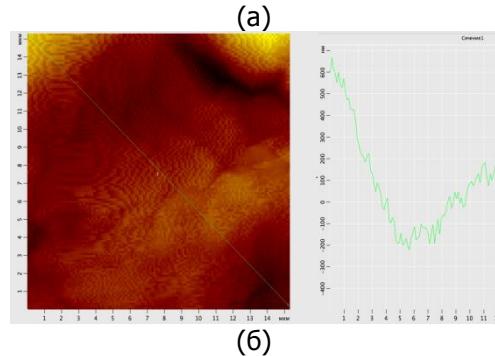


Рисунок 8 – 3-D визуализация исходной поверхности(а);  
Микропрофиль исходной поверхности(б)

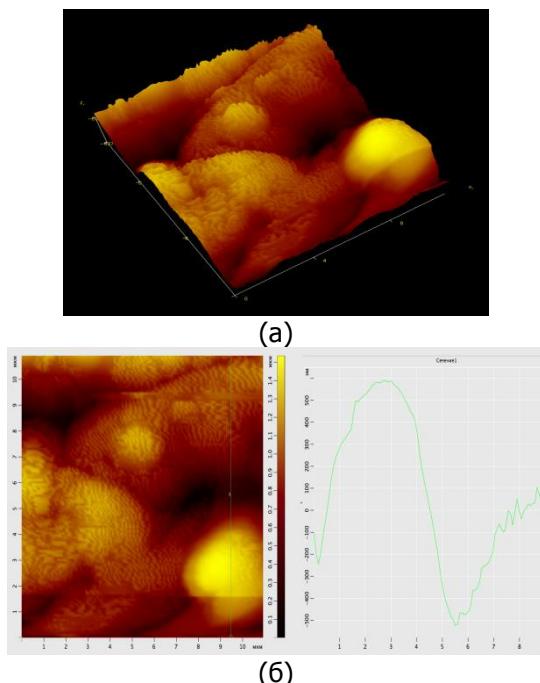
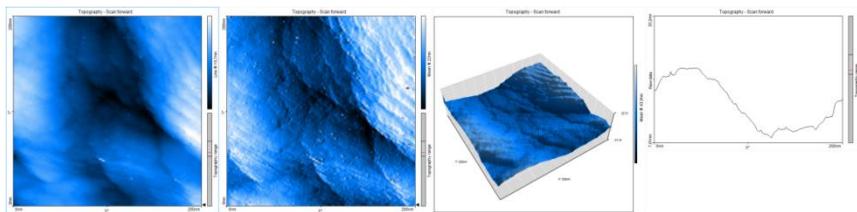
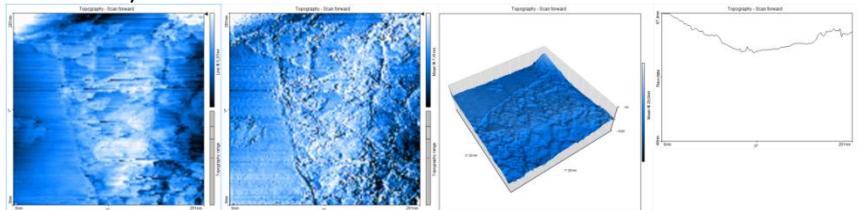


Рисунок 9 – 3-D визуализация поверхности с нанесенным  
 $\text{MoS}_2$ (а)  
(б) – Микропрофиль поверхности с нанесенным  $\text{MoS}_2$



а- 200нм.;



б - 200нм.;

Рисунок 10 – . а) Нанорельеф исходной поверхности стали 45 ;  
б) Нанорельеф поверхности с нанесенным  $\text{MoS}_2$

Как видно из представленных рисунков поверхность с покрытием дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) по сравнению с необработанной становится более пологой, микровыступы скруглены. Такое строение пленки, как показал анализ, обусловлено включением в нее наноразмерных структур. Внедрение наноразмерных структур в вибрационные механохимическое покрытие повышает эффективность твердых смазок установлено, что с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренного вещества увеличивается до 88%, это позволяет получать покрытия с уникально высокими свойствами./4/. Например, их долговечность в 2-7 раз выше, чем твердость крупнозернистых покрытий, прочность в 1.5-2 раза выше, а при уменьшении размера зерна от 10 мкм до 10 нм скорость износа покрытия уменьшается в 10 раз.

#### Выводы

Установлено, что вибрационные твердосмазочные механохимические покрытия  $\text{MoS}_2$  работают не только в

воздушной среде, но и в среде масла. Нанесение покрытия не требует сложного оборудования и высокой квалификации рабочих. Применение покрытия в парах трения увеличивает срок службы изделия в 10-20 раз, а с внедрение наноразмерных структур открывает уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, долговечности, износостойкости достаточно высокой пластичности сохраняя при этом высокие эксплуатационные свойства изделий.

- 
1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд.2е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008г. – 694с.
  2. Иванов В.В. Селеменев М.Ф., Марченко Ю.В Формирование вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена (статья) Журнал <<Известия Орел ГТУ>> № 2 (286) Орел. 2011. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии
  3. Иванов В.В., Лебедев В.А., Шишкина А.П. Влияние вибрационного механохимического покрытия MoS<sub>2</sub> на повышение износостойкости поверхности. Научно технический журнал. «Наукоемкие технологии в машиностроении» Москва 2014. - №6. ISSN: 2223-4608.
  4. Ivanov V.V. Lebedev V.A. Pinahin I. A. Improving Wear Resistance of Surface by Depositing Vibrational Vechanochemical MoS<sub>2</sub> Coating. Jornal of Friction and Wear, 2014. Vol. 35, No.4 ISSN 1068-3666,pp.339-342

## **ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕД ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Шишкина А.П., Крупеня Е.Ю, Лебедев В.А.  
ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

Качество и свойства получаемых покрытий во многом зависит от состояния исходной поверхности подложки. Так установлено, что блестящие покрытия следует осаждать на поверхность, параметр шероховатости которой должен быть не выше Ra 0,2...0,1 мкм./1/. Полублестящие и матовые – в интервале Ra 3,2...0,8 мкм. Детали из алюминиевых сплавов, на которые наносят твердые или электроизоляционные покрытия, предварительно подвергают обработке с тем, чтобы обеспечить получение параметра Ra не ниже 0,8 мкм.

Защитно-декоративная отделка деталей требует более тщательного подхода к выбору способа обработки и процессов подготовки поверхности.

Для предварительной и последующей обработки поверхности гарантирующей получение покрытий высокого качества принадлежит методам финишной обработки таким как: шлифование абразивными кругами и лентами, шлифование и полирование в барабанах, полирование кругами и лентами с полировочными пастами, различные виды вибрационной обработки. Для решения этих задач в машиностроительной практике особое место занимает отделочно- упрочняющая обработка в условиях виброволновых технологических систем , специально созданными для этих целей инструментами и обрабатывающими средами.

Как показали предварительные исследования в виброволновых технологических системах на финишных операциях (полирование, окончательное полирование) для обработки деталей из конструкционных сталей, чугуна, цветных металлов наряду с неорганическими средами эффективно могут быть использованы гранулированные обрабатывающие среды органического происхождения, которые имеют деревянистую или растительную структуру. Эти среды классифицируются по трем семействам: косточки фруктов; элементы из дерева; дробленые гранулы початковых растений.

Специфика этой группы обрабатывающих сред обусловлена растительным происхождением, в результате чего их физико-механические и биолого-химические свойства формируются в процессе созревания и последующей переработки и хранения. В отличие от неорганических сред они обладают меньшей твёрдостью, массой, не имеют абразивной составляющей, в результате чего характеристики динамического состояния органической среды, формообразующие и энергетические свойства имеют более низкие показатели по сравнению с виброобработкой деталей природными и синтетическими средами при аналогичных амплитудно-частотных характеристиках процесса.



Рис.2. Классификация сред органического происхождения по семействам

Эти особенности органических обрабатывающих сред предопределяют их технологическое назначение на операциях финишной отделки маложёстких, высокоточных деталей гидроаппаратуры, электротехнических изделий, медицинских инструментов, изделий бытового назначения, а также на операциях, обеспечивающих как подготовку поверхностей для нанесения антакоррозийных и других специальных покрытий, так и улучшения качества уже сформированных на поверхности покрытий.

Каждый вид семейства выделенных в группе органических сред в силу их растительной природы имеет свои особенности и требует проведения специальных научных исследований с целью технико-экономического обоснования их практического применения для получения функциональных покрытий в условиях виброволновых технологических систем.

**УДК621.787.6**

**КОНСТРУКЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТОЙКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ  
ВИБРОВОЛНОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ**

*Бабичев А.П., Давыдова И.В., Гомцян Г.С.*

*ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

*Представлена конструкция экспериментального приспособления и обоснована целесообразность ее использования для исследования стойкостных характеристик рабочей среды при виброударной обработке*

**Ключевые слова:** виброволновая упрочняющая обработка, приспособление, шары.

Достоверность и результаты исследований многих динамических методов обработки ППД, в значительной степени зависят не только от уровня используемой энергии, нагружения, характеристик и типа оборудования, но и от исходных условий контакта рабочей среды (инструмента) с обрабатываемой поверхностью детали и сохранения их постоянными во времени [2, 3]. Примерами таких методов могут служить чеканка, многоконтактный виброударный инструмент (ШСУ), виброволновая обработка и некоторые другие.

Упомянутые методы обработки имеют общий механизм формирования показателей качества поверхностного слоя, вызванный деформацией относительно малых участков поверхности обрабатываемой детали.

Проведение экспериментов одноконтактным инструментом может осуществляться на станках имеющих механизм подачи, которым обеспечивается первоначальное поджатие индентора к обрабатываемой поверхности на требуемую величину. В процессе осуществления виброударного (виброволнового) нагружения индентор внедряется в обрабатываемую поверхность, что сопровождается ее деформированием. Через определенный промежуток времени рост пластического отпечатка прекращается, вследствие прекращения действия усилия поджатия и образования зазора в технологической системе. Таким образом, схема обработки должна располагать постоянным

поджатием рабочей среды (индентора) к обрабатываемой поверхности.

При условии постоянного статического поджатия инструмента к обрабатываемой поверхности рост пластического отпечатка определяется физико-механическими свойствами материала детали, продолжительностью динамического воздействия, интенсивность его формирования зависит от уровня передаваемой энергии, а образование зазоров исключается [1]. Учитывая ранее сказанное, представляет интерес исследование процесса прохождения ударных волн при виброволновой обработке через волновод и производительность обработки виброударным инструментом ШСУ в условиях постоянного статического нагружения. С целью проведения экспериментальных исследований разработана конструкция приспособления, представленного на рис.1.

Приспособление 1 жестко закрепляется на площадку 5 вибрационного станка посредством резьбовых соединений. Конструкция приспособления включает в себя чашу 3, в которую устанавливается комплект грузов 4, для создания различных вариантов нагружения элемента рабочей среды (шарик 2). Эксперименты проводились на лабораторной вибрационной установке модели СВ 4х10. Само приспособление устанавливалось непосредственно на платформу вибрационного станка. Платформа получала колебания от вибратора с постоянной частотой  $\omega = 35 \text{ c}^{-1}$  с амплитудой  $A = 3,5 \text{ mm}$ .

Для проведения исследования использовались образцы плоской формы в виде пластины толщиной 2мм, изготовленные из алюминиевого сплава Д16 Г, АВТ1, и стали марок Ст 10 и Ст 20 ГОСТ 1050-88. Исследования диаметра отпечатка проводились в зависимости от величины нагрузления и времени обработки. Исследование состояния контактной поверхности осуществлялось визуально (при увеличении) по изменению шероховатости, появлению питтинговых образований, микротрещин АВТ1 и шелушения.

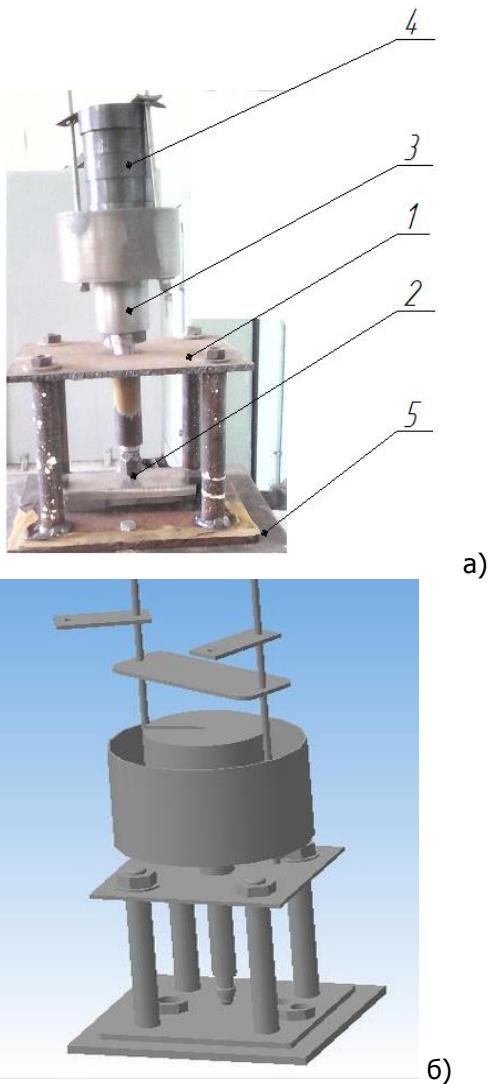


Рис. 1 Экспериментальное приспособление: а) конструкция; б) модель. 1 – приспособление; 2 – стальной шар; 3 – чаша; 4 – грузик; 5 – площадка.

Основными преимуществами разработанного приспособления являются:

- возможность использования в качестве виброударного инструмента стальной, или стержень со сферической контактной поверхностью;
- приспособление обеспечивает постоянное и контролируемое по величине и направлению нагружение (поджатие) инструмента в течение процесса обработки;
- получение достоверных результатов экспериментальных исследований;
- возможность осуществлять виброволновое нагружение при поддержании постоянного статического поджатия (и сохранения контакта) с поверхностью образца (детали).

Таким образом, используя предлагаемое приспособление, представляется обеспечить работу (деформирование) инструмента при постоянном поджатии и варьирование статического поджатия за счет размещения грузов 4 соответствующей массы в чаще 3.

---

1. Бабичев А.П. К вопросу разработки интегрированного суммирующего волноводного устройства для виброударной обработки./ Б.А. Гончаров, Н.С. Коваль, М.В. Медведев // Шлифабразив 2011: материалы международной научно-технической конференции «Шлифабразив 2011»: 2011г. – г. Волжский.

2. Киричек А.В., Степанов Ю.С., Соловьев Д.Л. Механика нагружения поверхности волной деформации. Машиностроение-1, 2005г, с.149.

3. Баскаков В.А. Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твердое тело. Автореферат дис..д-ра физ.-мат. наук. Чебоксары, 1991г, с.37

## **УДК 621.7.022.6.02**

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Самосудов А.П., Анисимов В.Н., Брихара В.И., Ерылкин В.А.  
ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

В настоящее время отечественной и зарубежной промышленностью выпускается ультразвуковое оборудование, позволяющее по сравнению с традиционными технологиями существенно увеличить производительность и качество

обработки объектов различного назначения, конфигурации и массо-габаритных показателей. При этом разработчики оборудования основное внимание уделяют обеспечению резонансного режима работы системы генератор-преобразователь; в качестве преобразователей у.з. технологических установок промышленного назначения, как правило, используют мощные у.з. магнитострикционные преобразователи различных конструкций.

Однако, при реализации процессов у.з. обработки в жидких средах, в основном таких как очистка, упрочнение, нанесение гальванических покрытий на эффективность процесса существенно влияют и массо-габаритные показатели объектов обработки, причем имеется ввиду влияние не площади обрабатываемой поверхности, а резонансные свойства объекта обработки. С учетом указанного, для достижения максимальной производительности процесса у.з. обработки желательно обеспечение резонансного режима работы системы генератор-преобразователь-объект, либо близкого к резонансному [1].

На рис. 1 показана блок-схема у.з. автоматизированной установки для очистки (нанесения гальванических покрытий, упрочнения) внутренних поверхностей труб и подобных изделий на основе применения у.з. магнитострикционных пакетных преобразователей кольцевого типа с наружным излучением и широкой полосой пропускания.

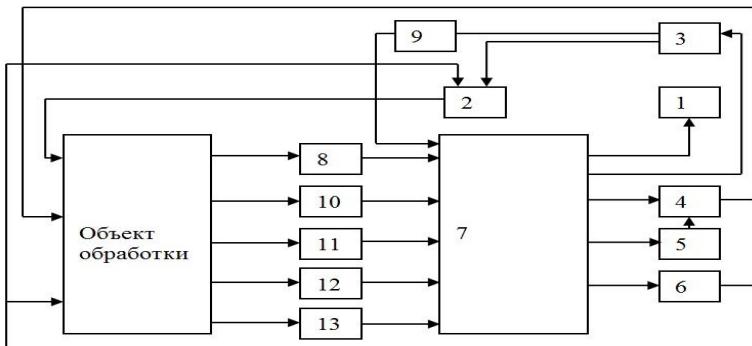


Рис. 1. Блок-схема ультразвуковой автоматизированной установки.

Установка состоит из у.з. генератора 1; у.з. рабочего органа 2; регулируемого привода 3 реверсируемого поступательного перемещения у.з. рабочего органа; насосной станции 4, обеспечивающей возможность режима работы установки при повышенном гидростатическом давлении в зоне обработки; нагревателя 5 технологической жидкости; выпрямительного агрегата 6 с возможностью использования как для комбинированного процесса очистки (уз + эх), так и для обеспечения процесса гальванопокрытия; системы управления 7 функционированием установки; датчиков: звукового давления в зоне обработки 8, положения рабочего органа 9, температуры технологической жидкости 10, гидростатического давления в зоне обработки 11, тока 12, чистоты обработанной поверхности 13.

Максимальная эффективность функционирования автоматизированного уз оборудования достигается на основе перехода от автоматизации только «действий» к автоматизации «принятия решений». Техническая сущность системного этапа в автоматизации заключается в переходе от стабилизации технологических параметров (интенсивность, частота, температура, гидростатическое давление и др.) и автоматизации повторных действий – цикловая автоматика, к решению с помощью современных средств вычислительной техники задач оптимального управления, т.е. автоматического выбора и реализации последовательности операций, режимных условий обработки наиболее эффективного варианта управления.

Таким образом, наиболее эффективной является разработка у.з. установок с использованием системы управления, которая на основе современной вычислительной и управляющей техники обеспечивает автоматизированное управление технологическим комплексом с использованием информации, обработанной по заданным технологическим и технико-экономическим критериям, определяющим количественные и качественные результаты обработки объекта.

Управляющая часть системы посредством управляющих воздействий обеспечивает оптимальные или экстремальные значения критерия управления в условиях наличия внешних возмущений, что характерно для работы промышленных установок и с учетом ограничений, накладываемых на пределы

изменения некоторых координат системы: частоты, интенсивности, температуры, давления и др.

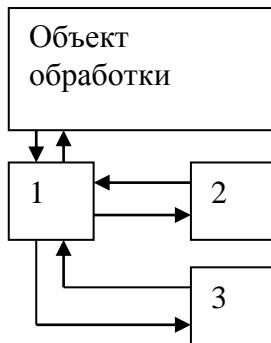


Рис. 2. Структура системы управления.

На рис. 2 показана упрощенная структура такой системы, в состав структуры входят:

- приборы и устройства локальной автоматики 1, к ним относятся датчики, нормирующие преобразователи, регуляторы с задатчиками, исполнительные механизмы и регулирующие органы;

- вычислительное устройство 2, на входе которого осуществляется преобразование аналоговых сигналов в цифровые, масштабирование, линеаризация, аппроксимация, и на основании этой информации и, в случае необходимости, сигналов от оператора, устройство по заложенным в виде программ алгоритмам управления формирует управляющие воздействия, поступающие на регуляторы, исполнительные механизмы и регулирующие органы устройства локальной автоматики;

- каналы связи с оператором 3.

Построение такой системы управления возможно на основе принципа централизованного управления, либо принципа децентрализованного управления.

Использование централизованного управления обуславливает удорожание каналов связи, ограниченную гибкость, усложнение программного обеспечения. С развитием микропроцессорных наборов и больших интегральных

логических микросхем предпочтительным представляется децентрализованное управление, осуществляющее на месте всю вычислительную работу, что ведёт к упрощению программирования, ускорению реакции в реальном времени, повышению надежности функционирования, относительной простоте структурных изменений системы.

---

1. В.Н. Анисимов, А.П. Самосудов, Л.А. Селиванова, В.А. Ерылкин. Пути повышения эффективности процессов ультразвуковой очистки: сб. научн. трудов межд. н-т конф. «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов: - Ростов н/Д; Издат. центр ДГТУ, 2013

## **VI. ПОДГОТОВКА И ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ.**

**УДК 3:001.891.573**

### **СИСТЕМА ОСНОВНЫХ ТИПОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ И АЛГОРИТМ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ(НА ПРИМЕРЕ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ)**

*Морозова А.В., Киричек А.В., Тарасов Д.Е., Алисова М.В.*  
Государственный университет - УНПК, г. Орел, Юго-Западный  
государственный университет, г.Курск, ОАО «ГМС Насосы», г.  
Ливны, Россия

#### **Постановка проблемы исследования и ее актуальность**

Социализация как процесс усвоения социальных и культурных норм и освоения социальных ролей является результатом объективно-субъектного взаимодействия и реализуется под влиянием определенной системы факторов [4]. В ходе такого взаимодействия индивидом как многопараметрическим социальным объектом (МСО) приобретается система определенных характеристик, позволяющая воспринимать его как личность. Совокупность

анализируемых МСО формируется на основе выделения их из всей совокупности имеющихся социальных объектов по наличию какого-либо приоритетного признака или признаков. Значения показателей, описывающих уровень сформированности собственных характеристик каждого анализируемого МСО, варьируется, что позволяет провести их типическую группировку, применяя методы квалиметрии социальных объектов [3, 4, 6]. В силу высокой степени сложности анализа всей совокупности социальных характеристик МСО целесообразно их характеристики кластеризовать, что позволяет использовать в качестве графической интерпретации полученной математической вариационной модели кластерные параметrogramмы МСО в форме лепестковой диаграммы, которые значительно упрощают выявление основных типов МСО [2, 6].

Таким образом, актуальность исследования обусловлена потребностью в научно-методическом обосновании типизации МСО процесса социализации, что имеет не только теоретическое, но и прикладное значение.

Рассмотрим процесс типизации многопараметрических социальных объектов социализации на примере выявления основных типов молодых специалистов инженерно-технического профиля при их трудоустройстве на промышленных предприятиях как результат подпроцесса профессиональной социализации в научно-образовательной среде вуза.

### **Пример кластеризация системы профессиональных компетенций молодых специалистов инженерно-технического профиля и выявление их основных типов**

Проведенный анализ отечественного и зарубежного подходов к вопросу формирования систем компетенций молодых специалистов инженерно-технического профиля позволяет сделать вывод о специфике решения этой проблемы в рамках СМК как промышленных предприятий, так и СМК учреждений системы профессионального образования России, и возможности ее комплексного решения с использованием обоих этих подходов.

Российская система профессионального образования посредством введения ФГОС третьего поколения взяла на себя

ответственность за формирование систем компетенций молодых специалистов в соответствии с профилем и направлением их подготовки. Перечень компетенций, перечисленных в каждом ФГОС, имеет большой объем (60 - 80 компетенций), что значительно осложняет анализ уровня их сформированности как в рамках научно-образовательного пространства вузов, так и в условиях социально-профессионального пространства рынка труда, промышленных предприятий и организаций. Каждый компонент системы компетенций молодого специалиста формируется в ходе реализации как нескольких учебных дисциплин в рамках научно-образовательного поля вуза, так и в условиях социально-профессионального поля промышленных предприятий, являющихся базами производственной практики молодых специалистов или местом их профессиональной деятельности при совмещении студентами образовательной и трудовой деятельности. Степень воздействия системы знаний, умений и навыков, формируемых в ходе реализации учебной дисциплины ФГОС на уровень сформированности подгруппы компетенций, описывается общей математической моделью типизации многопараметрических социальных объектов и носит долевой синергетико-суперпозиционный характер [4], что может быть определено аналитически с применением методов экспертного анализа, например, метода анализа иерархий. При реализации научно-образовательного процесса по направлению подготовки специалистов в социально-профессиональной группе уровень освоения каждой учебной дисциплины, а также уровень сформированности каждой компетенции у каждого анализируемого объекта различен, что позволяет на основании базовой метрико-уровневой модели кластеров компетенций специалиста выявить наличие определенных приоритетов в системе компетенций специалиста, используя шкалированные квадратичные модели компетенций специалиста инженерно-технического профиля подготовки [6, 7, 8].

Основные различия в уровнях сформированности отдельных компонентов системы компетенций молодого специалиста инженерно-технического профиля максимально сопоставимы с системой подгрупп компетенций европейской модели инженерного образования и могут быть положены в основу кластеризации совокупности компетенций молодых

специалистов, определенных в рамках действующих ФГОС [9]. Таких кластеров, по нашему мнению, целесообразно выделить шесть:

- К1 - «Знания и понимание»;
- К2 - «Инженерный анализ»;
- К3 - «Инженерное проектирование»;
- К4 - «Инженерная практика»;
- К5 - «Исследования»;
- К6 - «Личностные качества».

Предлагаемая система кластеров компетенций удобна для анализа индивидуальной структуры компетенций молодого специалиста как в условиях СМК вуза - поставщика кадров для производства, так и в СМК промышленных предприятий - заказчиков на подготовку специалистов, анализирующих социально-профессиональные качества (компетенции) принимаемых на работу, так и работодателей - субъектов труда, формирующих систему требований к конкурентным преимуществам (требования к структуре и уровню сформированности системы компетенций специалистов) для претендентов на вакантные должности в условиях рынка труда.

Применив методы статистики качеств, можно идентифицировать анализируемый объект на предмет принадлежности к определенному социально-профессиональному типу специалистов, имеющих одинаковый образовательный уровень. Для этого на основе кластеризованной системы компетенций (компетентностных кластеров)  $K_i$ , где  $i = 1, \dots, 6$ , выявляют по аналогии с построением базовой метрико-уровневой модели кластеров компетенций 7[] уровни приоритетности в кластерах компетенций специалистов (приоритет I уровня, приоритет II уровня и т.д.) и экспертными методами (например, МАИ) устанавливают их соответствие определенному типу объектов (ИТР) процессов кадрового обеспечения интегрированных СМК промышленных предприятий.

Пусть, например, для  $p$ -объекта задана совокупность значений  $T_{pi}$ ,  $i = 1, \dots, 6$ , характеризующая уровень сформированности его  $i$ -го компетентностного кластера  $K_i$ , где

$i = 1, \dots, 6$ . Квалиметрическая типизация специалистов реализуется на основе нескольких подмоделей:

- $p$ -объект - выпускник вуза, молодой специалист;
- $p$ -объект - претендент на вакантную должность;
- $p$ -объект - специалист, участвующий в добровольной сертификации.

Среди всей анализируемой вариативной совокупности инженерно-технических кадров выделим подсистему специалистов, имеющих высшее инженерное образование. Такие специалисты по окончании вуза могут занимать следующие должности: «инженер», «инженер-конструктор», «инженер-технолог», «инженер-исследователь» и т.д., представленные в проектах Профессиональных стандартов. Используя методы статистики качеств многопараметрических объектов, составляющих теоретическую базу квалиметрической типизации специалистов, определяют системы приоритетов (на практике - приоритетов первого и второго уровней), позволяющей на основе совокупности значений  $T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}, T_{p4}, T_{p5}, T_{p6}$ , характеризующих уровни сформированности компетентностных кластеров  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$   $p$ -объекта, определить, к какому именно виду инженерной деятельности наиболее адаптирован данный специалист, т.е. идентифицировать его с определенным типом должности ИТР процесса кадрового обеспечения СМК промышленного предприятия.

Определение приоритетов первого и второго уровней проводится с применением экспертных систем (например, системы поддержки принятия решений Expert Decide). Так в соответствии с проведенной экспертизой были получены следующие результаты, представленные в таблице 1 (система анализируемых типов должностей ИТР соответствует задаче квалиметрико-компетентностной типизации профессиональных кадров для группы объектов «выпускник вуза, молодой специалист»).

Таблица 1

## Структура квалиметрических приоритетов при типизации инженерных специалистов по должности

Возможные наименования должности	Приоритет первого уровня	Приоритет второго уровня	Приоритет третьего уровня
Инженер	K4	K1 и K2	K3, K5, K6
Инженер-технолог	K2	K1 и K4	K3, K5, K6
Инженер-конструктор	K3	K1 и K2	K4, K5, K6
Инженер-исследователь	K5	K2 и K4	K1, K3, K6

Пример такой приоритетно-структурированной уровневой диаграммы для реализации задач квалиметрико-компетентностной типизации инженерно-технических кадров приведен на рисунке 1 (диаграмма построена для ситуации использования единой шкалы профессиональных компетенций специалистов, занимающих должность определенного квалиметрико-компетентностного типа, без учета пороговых уровней сформированности компетентностных кластеров).

По мере приобретения практического опыта (профессионального стажа работы), повышения квалификации или профессиональной подготовки может проводиться ротация кадров и их продвижение по карьерной траектории, что влечет за собой смену должности, например, «инженер» → «инженер 3 категории» → «инженер 2 категории» → «инженер 1 категории». В одних случаях такая процедура проводится в рамках корпоративных процедур аттестации профессиональных кадров интегрированных СМК промышленных предприятий без проведения их сертификации, в других - на основе процедуры сертификации, реализация которой осуществляется на базе

независимых государственных центров оценки и сертификации кадров, осуществляющих свою деятельность на основе профессиональных стандартов. В такой ситуации помимо определения приоритетов первого и второго уровней для выявления квалиметрико-компетентностного типа специалиста требуется еще и установление пороговых уровней компетентностных кластеров  $T_1^{\min}, T_2^{\min}, T_3^{\min}, T_4^{\min}, T_5^{\min}, T_6^{\min}$  для каждого типа инженерно-технического работника. Эти уровни могут устанавливаться также с применением экспертных методов.

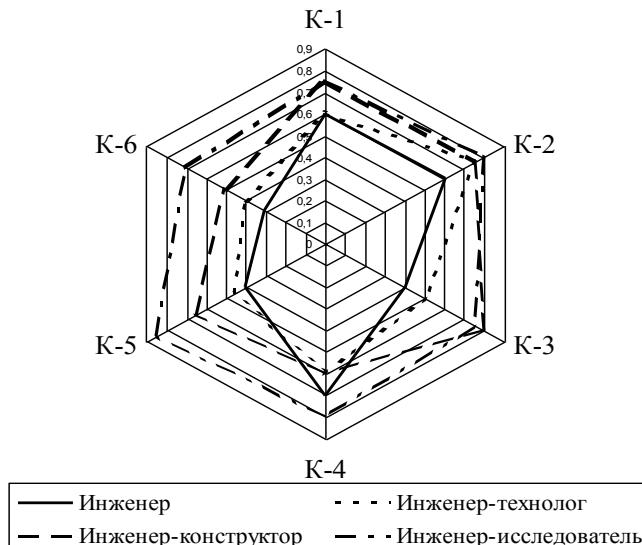


Рисунок 1 - Приоритетно-структурированная уровневая диаграмма для квалиметрико-компетентностной типизации совокупности инженерно-технических работников предприятия

### **Вывод**

Разработка уровневых диаграмм квалиметрико-компетентностной типизации специалистов определенного профиля позволяет, с одной стороны, выявить их основные типы (на основе структурной модели квалиметрических приоритетов при типизации кадров по должности) и требования к уровню сформированности компетентностных кластеров, что весьма актуально при отборе молодых специалистов для наукоемкого производства.

С другой стороны, модели квалиметрических приоритетов при типизации кадров по должности могут использоваться для разработки автоматизированной системы «Мониторинг результативности профессиональной деятельности ИТР», решающей большой спектр прикладных задач. В третьих, на основании таких диаграмм формируются базы данных для обучения нейронной сети, применяемой для квалиметрико-компетентностной типизации специалистов в качестве аналитической базы сравнения исследуемых объектов с вариативным рядом их основных должностных типов.

Таким образом, общий подход к формированию модели типизации многопараметрических социальных объектов позволяет сформировать алгоритм ее применения при анализе результатов различных подпроцессов социализации. В частности, алгоритм определения основных типов МСО можно представить следующими модулями:

1. Выбор системы кластеров социально-профессиональных компетенций основных типов инженерно-технических работников (ОТ ИТР)
2. Определение приоритетов первого и второго уровней компетентностных кластеров ОТ ИТР
3. Формирование перечня анализируемых ОТ ИТР
4. Выбор пороговых и дифференцирующих уровней компетентностных кластеров
5. Построение нормированной кластерной компетенциограммы специалиста
6. Идентификация специалиста с ОТ ИТР

Кроме того, модель типизации многопараметрических социальных объектов позволяет разработать методику их идентификации с определенным типом; например, при анализе результативности подпроцесса профессиональной социализации можно осуществлять идентификацию молодых специалистов с определенным типом профессиональной деятельности.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-01-00147 а.**

---

1. Азгальдов, Г.Г. Квалиметрия жизни [Текст] / Г.Г. Азгальдов, В.Н. Бобков, В.Я. Ельмееев, Ю.С. Переvoщиков, В.А. Беляков. – Ижевск: Издательство Института экономики и управления УдГУ, 2006. – 820 с.
2. Киричек, А.В. Разработка модели оценивания уровня сформированности кластеров компетенций специалиста машиностроительного профиля [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-4(292). – С.131-137.
3. Морозова, А.В. Методологические основы формирования модели квалиметрического оценивания компетенций специалиста для машиностроительного производства [Текст] / А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 1(291). – С.69-81.
4. Морозова, А.В. Модель квалиметрии и типизации многопараметрических социальных объектов процесса социализации [Текст]: Социально-экономические аспекты технологической модернизации современного машиностроительного производства: коллективная монография / А.В. Морозова, А.П. Чирков, Н.В. Чигиринская и др.; Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2013. - С. 121 - 145.
5. Морозова, А.В. Профессиональная социализация студентов ссузов в условиях модернизации институтов образования [Текст]: дис. ... канд. соц. наук: 22.00.04 /Анна Валентиновна Морозова. - Тула, 2004. - 175 с.
6. Морозова, А.В. Процедура шкалирования оси линейной модели оценки уровня сформированности компетенции специалиста технического профиля [Текст] / А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2. – С.100-105.
7. Разработка практикоориентированной системы оценивания качества подготовки специалистов для машиностроения [Текст]: В 2 ч.: отчет по НИР (промежуточ., 3 этап): [ Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)»; шифр темы 3.4.1/3218] /Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет»; рук. Киричек А.В.; исполн.: Морозова А.В., Алисов А.А. [и др.]. - Орел, 2010. - 595 с. - Библиогр.: с. 150-153. № ГР01.2.00 901041. - И nv. № 7500.
8. Разработка и внедрение многоуровневой практикоориентированной системы оценивания качества подготовки специалистов для машиностроения [Текст]: В 2 ч.: отчет по НИР (промежуточ., 3 этап): [ Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)»; шифр темы 3.4.1/3218] /Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет»; рук. Киричек А.В.; исполн.: Морозова А.В., Алисов А.А. [и др.]. - Орел, 2010. - 595 с. - Библиогр.: с. 150-153. № ГР01.2.00 901041. - И nv. № 7500.

EUR-ACE [Электронный ресурс]. – URL:  
<http://www.enaee.eu/enaee/presentation.htm>

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОДГОТОВКИ  
СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
НЕСТАНДАРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Игнатьев Н.П., Лебедев В.А., Захарова О.А.

ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Сегодня практически всем промышленным предприятиям нужны не производственные менеджеры (мастера, нач. цехов), способные управлять сложившимся производством, а инженеры разработчики и прежде всего конструктора, которых сегодня целевым образом не готовит ни один технический университет в стране. Ярким подтверждением этого является то, что, несмотря на наличие большого количества научных разработок в области нанотехнологий, предприятия практически ни одну научную разработку не могут довести до эффективного промышленного использования, поскольку необходимые для этого уникальное оборудование и автоматизированную оснастку проектировать некому.

Создаваемые в последнее время в стране совместные промышленные предприятия коренным образом не меняют ситуации, поскольку их локализация практически не осуществляется из – за низкого технического уровня наших промышленных предприятий, повышение которого также невозможно без квалифицированных инженерных кадров. В тоже время экономическая политика ведущих отечественных финансово – промышленных групп направленная на модернизацию конкретных производств за счет закупки прогрессивного технологического оборудования у ведущих зарубежных производителей поставило нашу страну в тесную зависимость от политической обстановки в мире, о чем свидетельствуют принимаемые против России экономические санкции.

Почему сегодня уровень подготовки молодых специалистов (бакалавров, магистров), закончивших технические университеты таков, что они не в состоянии решать задачи, возникающие в реальном производстве, не говоря уже о самостоятельном проектировании новых технических объектов? Это объясняется тем, что ни одна из преподаваемых в

технических университетах общих и специальных дисциплин не формирует необходимые инженеру разработчику компетенции, которые четко и однозначно прописаны в ФГОС ВПО утвержденных еще в конце 2009г. Вот их перечень:

- формирование целей проектных задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях, построения структуры их взаимодействия.
- разработка технических заданий на проектирование и изготовление машин,
- оформление законченных проектно – конструкторских работ и разработка технической документации (программ испытаний, эксплуатационных документов),
- обеспечение технологичности изделий,
- проведение патентных исследований,
- исследование причин брака при проектировании,
- осуществление авторского надзора за изготовлением, монтажом, наладкой, испытаниями и сдачей в эксплуатацию опытных образцов создаваемых изделий,
- разработка программ инновационной деятельности предприятия.

Для формирования компетенций необходимых инженеру разработчику и прежде всего конструктору разработано и издано в 2011 – 2014 гг. четыре учебных и справочно - методических пособия под общей рубрикой «Методика проектирования» в том числе:

- учебное пособие «Основы проектирования», часть 1 «Общая методика проектирования», 2 «Методика проектирования механизмов и систем»;
- справочное пособие «Обеспечение точности при проектировании приводов и механизмов»;
- справочное пособие «Проектирование нестандартного оборудования»;
- справочное пособие «Проектирование сборочной оснастки и оборудования».

Все эти работы, написанные инженером Игнатьевым Н. П. на основании опыта проектирования большого количества технических объектов для различных областей техники. В них помимо методического подхода к последовательному выполнению этапов проектирования, начиная с постановки

задачи на проектирование и поиска технического решения и кончая разработкой КД и проведением авторского надзора за изготовлением опытного образца, содержится большое количество реальных примеров демонстрирующих эффективность предлагаемой методики.

С содержанием пособий и рецензиями на них, полученными от крупных ученых и инженеров, занимающихся созданием новых оригинальных технических объектов, а также с большим количеством статей, написанных на основе соответствующих разделов перечисленных пособий можно познакомиться сайте «Методы проектирования. РФ»

Однако наличие вышеуказанных пособий не решает в полной мере задачу по подготовке квалифицированных инженеров разработчиков и прежде всего конструкторов по следующим причинам:

- невозможность непосредственного введения в учебный процесс технических университетов еще одной дисциплины, изучающей методику проектирования;
- сложность определения той части студентов, которые действительно способны стать инженерами разработчиками;
- необходимость практического обучения созданию новых технических объектов (проектирование, авторский надзор за изготовлением, сборкой, наладкой и доводкой опытного образца), что требует выполнения реальных проектов с участием в этом процессе опытных инженеров разработчиков.

По нашему мнению, подготовку квалифицированных инженеров разработчиков, способных самостоятельно выполнять проекты новых, оригинальных технических объектов наиболее результативно проводить с молодыми инженерами уже принявшими решение работать в конструкторских подразделения конкретных промышленных предприятий. При этом их обучением должны заниматься подразделения технических университетов не участвующие в учебном процессе, такие как, например «Курсы повышения квалификации», а формой для изучения теоретической части «Методики проектирования» может служить «дистанционная форма обучения», позволяющая в значительной степени экономить как время на обучение, так и необходимые для этого средства. При этом структура и статус этих формирований должен существенно

измениться, и в конечном итоге они могут перерости в инженерные центры с более широкими функциями, чем подготовка квалифицированных инженерных кадров.

**УДК 658.64; 338.48.02**

**О РАЗРАБОТКЕ ОЦЕНОЧНОГО ДИСТАНЦИОННОГО СТАНДАРТА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ НАУКОЁМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

*Просандеев В.А.  
ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия*

Уже, в модельном законе «Об инновационной деятельности», подготовленном рабочей группой постоянной комиссии межправительственной парламентской ассамблеи государств – участников СНГ по науке и образованию, и в Президентской программе повышения квалификации инженерных кадров на 2012 - 2014 годы, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 594 "О Президентской программе повышения квалификации инженерных кадров на 2012 - 2014 годы", тщательно сформулированы меры государственной поддержки системы профессионального образования, подготовки и повышения квалификации специалистов в сфере инновационной деятельности.

Среди них автор исследования [1]справедливо называет такие как:

- разработка системы государственных требований к профессиональной подготовке и квалификации инженеров, технологов, менеджеров и иных специалистов, связанных с обеспечением инновационной деятельности;
- формирование государственных заказов на подготовку специалистов в области производства высокотехнологичной наукоемкой продукции;
- разработка требований к системе аттестации, повышения квалификации и подготовки кадров в области высоких технологий;

- поддержка деятельности профессиональных саморегулируемых организаций, способствующих повышению квалификации специалистов в сфере инновационного предпринимательства;
- пропаганда научных знаний и технических достижений, поддержка технического творчества молодежи и ее профессиональной ориентации.

Вывод отсюда следует незамедлительно - необходимость принятия перечисленных мер обусловлена, прежде всего, объективно существующей проблемой неадекватности профессионального образования тенденциям социально-экономического, научно-технического и культурного развития государства, указывающей на необходимость дальнейшего совершенствования системы профессиональной подготовки специалистов для научноемких производств.

В связи с изложенным , было бы целесообразно разработать оценочный дистанционный стандарт специалистов для научноемких технологий в машиностроении, включающий типовые требования к освоению слушателями дистанционных инфопрограмм отдельных модулей соответствующих курсов. Так , группе независимых тьюторов ( ГНТ ) , можно предложить разработку для слушателей уровней освоения инновационных методик и разработок в области аддитивных технологий в машиностроении.

Если за первый уровень принять правильные ответы на вопросы по ориентации на текущие и перспективные потребности предприятий машиностроительной отрасли, то автоматически можно было бы диагностировать ответ на определенную сумму баллов , например – 6 баллов - за количество предлагаемых статей по дополнительным профессиональным компетенциям специалистов в области аддитивных технологий и прототипирования (быстрой «черновой» реализации базовой функциональности для анализа работы системы в целом). Тогда бы подобное обучение включало бы в себя 3 модуля:

1. Аддитивные технологии. Методы оцифровки и контрольно-измерительные машины
2. Аддитивные технологии и быстрое прототипирование. Аддитивные технологии и литейное дело.

### **3. Аддитивные технологии и «прямое производство». Аддитивные технологии и порошковая металлургия [2].**

В данном направлении интересно, в нашем понимании, построен процесс обучения в ОАО «ВПК «НПО машиностроения», где организована «Школа молодого рабочего». Здесь, помимо основной специальности, обучение проходит по специальным программам. В них входит изучение современных технологий проектирования и производства, электронного документооборота, международных стандартов качества, компьютерной грамотности, английского языка, основ международного военно-технического сотрудничества. Итогом обучения является присвоение разряда по специальности с получением сертификата молодого рабочего [3].

Таким образом, мы бы нашли некий формализованный подход к стимулированию у слушателей определенных соревновательных мотиваций, направленных к конечной цели обучения – усвоить и закрепить полученные знания. В то же время предлагается создать на базе дистанционных инфотехнологий образования активный онлайновый методический материал для более полного освещения и усвоения прогрессивных инновационных дисциплин.

- 
- 1.<http://www.dissercat.com/content/organizatsionno-pedagogicheskie-usloviya-podgotovki-spetsialistov-naukomikh-proizvodstv-v-cadry.ru/sites/default/files/filefield/46/Презентация%20УМК%20Аддитивные%20технологии.pdf>
  - 2.<http://engineer-cadry.ru/sites/default/files/filefield/46/Презентация%20УМК%20Аддитивные%20технологии.pdf>
  3. <http://www.npmash.ru/staff/ru/podgotovka.htm>

## **ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*Глазман В.С.*

ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Современные направления развития машиностроения должны быть направлены на совершенствование и разработку процессов с целью повышения эффективности, снижения расхода энергоресурсов, росту производительности труда, улучшению условий труда и экологии. В совокупности все должно вестись к повышению конкурентоспособности создаваемой продукции. В этом отношении одно из направлений

-получение оптимальной заготовки для дальнейшего применения.

В настоящее время на многих предприятиях мира, в России получают заготовки методом литья. Такими прогрессивными методом являются литье под давлением, в кокиль, литье по выплавляемым моделям. В частности на предприятиях г. Ростова-на-Дону используются эти методы для получения заготовок. На заводе «Газоаппарат» получают заготовку методом литья под давлением. Отливки производят на машинах литья под давлением с горизонтальной холодной камерой прессования. Машины производства Тираспольского завода. Несмотря на то, что машины эксплуатируются уже много лет, они в прекрасном состоянии, очень надежны. Это объясняется содержание машины на высоком уровне. Процесс полуавтоматический. Пресс-формы многоместные. Если приобрести новые машины, то это будет очень большие затраты, которые себя не окупят. Полученные отливки затем обрабатываются методом виброшлифовки, что обеспечивает приближение заготовки к готовой детали. Поэтому выпускаемая продукция конкурентоспособна, поставляется не только в Россию, но и за рубеж.

Еще на одном из заводов г. Ростова-на-Дону выпускаются отливки методом по выплавляемым моделям и в кокиль. Отливки изготавливается как стальные, так и алюминиевые из приготовленных сплавов. Процесс полуавтоматический. Плавка осуществляется как в печах на газовом топливе, так и в электрических печах. И на этом же предприятии финишная обработка осуществляется методом виброшлифовки. После процесса литья на полученных отливках имеются заусенцы различной толщины (0.3 — 0.6мм). При процессе виброшлифовки заусенцы удаляются. Процесс длится до 4 часов. При этом одновременно происходит уменьшение шероховатости поверхности, подготовка поверхности под различные покрытия.

Метод виброшлифовки по сравнению с галтовкой и механической обработкой отливок увеличивает производительность труда, условия труда, улучшает качество отливок и изделий, улучшает экологию. Этот метод находит широкое применение на предприятиях нашего города, в других регионах России, а так же и за рубежом.

## Оглавление

<b>I. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ, МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ И ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ. ....</b>	3
ВИБРОУДАРНАЯ И ВИБРОВОЛНОВАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, АВТОМОБИЛЬНОГО И Ж.Д. ТРАНСПОРТА) <b>Бабичев А.П., Бабичев И.А., Мотренко П.Д., Пастухов Ф.А.</b>	3
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРОАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ <b>Тамаркин М.А., Вяликов И.Л., Тищенко Э.Э.</b>	11
ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ <b>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Медведев М.Н.</b>	18
ВОЛНОВАЯ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ КОЛЕБЛЮЩИМСЯ РОЛИКОМ С МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ <b>Бутенко В.И.</b>	23
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ С ВИБРАЦИЯМИ <b>Божкова Л.В., Вартанов М.В., Мартынович Н.А.</b>	30
РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ <b>Попов М.Е., Попов А.М., Попова С.О.</b>	333
ВИБРАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНТЕНСИВНО ВИБРИРУЮЩИХ МНОГО МАССНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДАХ <b>Копылов Ю.Р., Мышияков А.И.</b>	422
РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ВИБРУСТАНОВОК С ТОРОИДАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРОЙ <b>Серга Г.В., Иванов А.Н.</b>	

.....	48
ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ <b>Сафонов С.В., Смоленцев В.П., Гребенщиков А.В.</b>	.....
.....	556
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ <b>Лебедев В.А., Иванов В.В., Давыдова И.В.</b>	.....
.....	61
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН <b>Хейфец М. Л., Васильев А. С., Клименко С. А., Танович Л.</b>	.....
.....	67
ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН <b>Дудников А.А., Беловод А.И.</b>	.....
.....	72
УТИЛИЗАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФРАКЦИИ ШЛИФОВАЛЬНОГО ШЛАМА ПО МАГНИТОВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ <b>Вернигоров Ю.М., Плотников Д.М., Гордин Ю.А.</b>	.....
.....	78
3D AFM ROUGHNESS OF SINTERED NANOMATERIALS PRODUCED BY HOT ISOSTATIC PRESSING (HIP) <b>T. Sayah<sup>1</sup>, K. Hamouda<sup>1</sup></b>	.....
.....	89
<b>II. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАТЕРИАЛАХ И СРЕДАХ.....</b>	<b>92</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВИБРОУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ВИБРОПРЕССЕ <b>Искович-Лотоцкий Р.Д., Миськов В.П.</b>	.....
.....	92
РОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ <b>Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Клименко В.Г., Рязанова-Хитровская Н.В.</b>	.....
.....	97

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО МЕХАНО-ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	<b>Варавка В.Н., Кудряков О.В., Моисеева И.В.</b>	1011
ЭЛЕКТРОГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСТАЛИВАНИЕ ПРИ ИНФРАЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ВОССТАНАВЛИВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ	<b>Копылов Ю.Р., Горожанкина О.В.</b>	10707
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ	<b>Мирошниченко И.П.</b>	11313
ОСОБЕННОСТИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО В НЕОДНОРОДНОМ ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СЛОЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ	<b>Егорова С.И., Егоров Н.Я., Лемешко Г.Ф., Черный А.И.</b>	11515
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРОУДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ CUDA	<b>Копылов Ю.Р., Верзилина О.А. 11</b>	12222
ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ УДАРНОЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ СПЕКАНИЕ	<b>Лемешев С.В., Агеев С.О., Рачков М.А., Перлов Д.С., Нескоромный С.В.</b>	13030
ОСНОВЫ ВИБРОВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ В ВИНТОВЫХ БАРАБАНАХ	<b>Марченко А.Ю.</b>	13737
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ	<b>Колесников И.В.</b>	15454

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАЛИ ГАТФИЛЬДА ОБЪЁМНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ <b>Пинахин И. А., Черниговский В. А., Ягмурев М. А.</b>	15959
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ УПРОЧНЕННОГО В УСЛОВИЯХ УДАРНО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ <b>Лебедев В.А, Соколов В.Д., Штынь С.Ю.</b>	162
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ ИНСТРУМЕНТА <b>Афонин А.Н.</b>	16767
<b>III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ДРУГИХ СФЕРАХ ПРОИЗВОДСТВА.</b>	172
АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА В ВИБРИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ ИЗ СМЕСИ ГРАНУЛ <b>Бранспиз Е.В., Бранспиз М.Ю., Кудряшова Д.С.</b>	172
ВИБРАЦИОННЫЕ И ВИБРОУДАРНЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН <b>Искович-Лотоцкий Р. Д., Манжилевський О. Д., Иванчук Я. В.</b>	177
К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОМОЛА В БИЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЕ <b>Егоров И.Н.</b>	189
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЫБОРА МЕТОДА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ <b>Попов М.Е.</b>	192
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С	

ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ППД <b>Попов М.Е.,</b> <b>Эль Дақдуки Ахмад</b>	20404
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОВОДКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВВЕДЕНИЕМ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ <b>Маляренко А.Д., Митенков М.В.</b>	21010
ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПЛОСКОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА <b>Василенко О.А., Тюхта А.В., Василенко Ю.В.</b>	21313
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОПРЕССОВКА, ПОД ПОСЛЕДУЮЩУЮ ПАЙКУ <b>Лемешев С.В., Агеев С.О., Рачков М.А., Перлов Д.С., Стрижаков Е.Л.</b>	21818
ВЛИЯНИЕ ОБЪЁМНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ (ОИЛУ) НА СТОЙКОСТЬ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ <b>Пинахин И. А., Аксенова И. С., Черниговский В. А., Ягмурев М. А.</b>	22222
IMPROVED SURFACE QUALITY BY THE PROCESS OF VIBRATORY GRINDING <b>M.A.Djema<sup>1, a</sup>, K. Hamouda<sup>1, b</sup> A. P. Babichev<sup>c</sup>, and D. Saidi<sup>d</sup></b>	22727
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ВСТАВОК ДОРНОВАНИЕМ <b>Исаев А.Н., Федоренко А.А., Лесняк С.В.</b>	22828
<b>IV. ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВОГО И ВИБРОВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ; МЕХАНОХИМИЯ ПРОЦЕССОВ; НАНОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	23233
К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО СУММИРУЮЩЕГО ВОЛНОВОДНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ Бабичев А.П., Бирюков Д.Д., Гончаров Б.А., Медведев М.Н.	23333

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОМУ ВЫКРАШИВАНИЮ ОБРАЗЦОВ С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ СТАЛЕЙ 45, 40Х, 35ХГСА <b>Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В.</b>	23838
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЪЁМА МЕТАЛЛА ПО ТЕХНОЛОГИИ NVidia CUDA С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D ВИДЕОКАРТ ПРИ ВИБРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ <b>Копылов Ю.Р., Копылов С.Ю.</b>	24143
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ЗАКОНА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБОТКОЙ ППД ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ <b>Попов М.Е., Ельшайх Ахмад</b>	24646
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРМЕТРОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ <b>Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Шведова А. С., Казаков Д. В.</b>	25151
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ <b>Тихонов Ан. А., Тихонов А.А.</b>	26161
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ РАЗБОРКИ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РЕМОНТЕ И УТИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ. <b>Бабичев А.П., Эссола Дьедонне., Пастухов Ф.А., Чаава М.М.</b>	267
СИНТЕЗ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ АЛМАЗОВ И ПЛОТНЫХ ФОРМ ВН <b>Витязь П.А., Сенють В.Т., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г., Клименко С.А.</b>	275
ПЛАСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ – ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЁЖНОСТИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ <b>Дудников А.А., Канивец А.В., Келемеш А.А.</b>	280

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ <b>Пасюта А.Г.</b>	285
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ <b>Зацепилин А.Н.</b>	289
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА РАДИУС КРОМКИ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ <b>Бабичев А.П., Гутета Кабета Вейесса, Пастухов Ф.А., Чаава М.М.</b>	297
КОНЦЕПЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА БИ-МАТЕРИАЛА <b>Соболь Б.В., Рашидова Е.В., Борисова Е.В.</b>	305
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДИФФУЗИИ ЦИНКА ПРИ ЕГО НАНЕСЕНИИ НА СТАЛЬНУЮ ПОДЛОЖКУ МЕТОДОМ ВИМХТО <b>Анкудимов Ю.П., Чернега Ю.Г., Рейзвих В.А.</b>	306
ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД СКЛЕИВАНИЕ <b>Козулько Н.В.</b>	311
ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ-ФОРМОВКИ ОБЛЕГЧЁННЫХ ЭКРАНИРУЮЩИХ КОРПУСОВ ЗАДЕЛКИ КАБЕЛЯ В ШТЕПСЕЛЬНЫЙ РАЗЪЁМ <b>Агеев С.О., Лемешев С.В, Рачков М.А., Перлов Д.С., Нескоромный С.В.</b>	31616
<b>V. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЛНОВЫХ И ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	319
ПРИВОД УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБ С ВОЗВРАТНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ <b>Искович-Лотоцкий Р.Д., Булыга Ю.В.</b>	320
ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ В НАПРАВЛЯЮЩИХ ТОКАРНОГО СТАНКА НА ТОЧНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	

СТАБИЛИЗАЦИИ СИЛ РЕЗАНИЯ <b>Мельникова Е.П., Быков В.В., Боднар С.В.</b>	325
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РИСКА СНИЖЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИБРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА <b>Прокопец Г.А., Прокопец А.А., Дегтярев Е.</b>	331
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЁННОГО МЕТОДОМ ЭЛАН <b>Самосудов А.П., Анисимов В.Н., Аль-Тибби В.Х., Поздняков А.Г.</b>	338
РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ УСТРОЙСТВ С БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДОЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН <b>Лебедев В.А. Иванов В.В., Серга Г.В.</b>	344
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО ПОКРЫТИЙ $MOS_2$ <b>Иванов В.В., Попов С.Н., Марченко Э.В.</b>	352
ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕД ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВИБРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ <b>Шишкина А.П., Крупеня Е.Ю, Лебедев В.А.</b>	362
КОНСТРУКЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВИБРОВОЛНОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ <b>Бабичев А.П., Давыдова И.В., Гомцян Г.С.</b>	365
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	

<b>Самосудов А.П., Анисимов В.Н., Брихара В.И., Ерылкин В.А.</b>	.....	368
<b>VI. ПОДГОТОВКА И ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ. ....</b>	.....	372
<b>СИСТЕМА ОСНОВНЫХ ТИПОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ И АЛГОРИТМ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ(НА ПРИМЕРЕ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ) <b>Морозова А.В., Киричек А.В., Тараксов Д.Е., Алисова М.В.</b></b>	.....	372
<b>МЕТОДОЛГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСТАНДАРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ <b>Игнатьев Н.П., Лебедев В.А., Захарова О.А.</b></b>	.....	381
<b>О РАЗРАБОТКЕ ОЦЕНОЧНОГО ДИСТАНЦИОННОГО СТАНДАРТА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ НАУКОЁМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ <b>Просандеев В.А.</b></b>	.....	384
<b>ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ <b>Глазман В.С.</b></b>	.....	386

Научное издание

ВОЛНОВЫЕ, ВИБРОВОЛНОВЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ,  
МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ  
И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ

Сборник трудов  
международного научного симпозиума  
технологов-машиностроителей и механиков  
(Ростов-на-Дону, 7 – 10 октября 2014 г.)

Статьи публикуются в авторской редакции  
Ответственный за выпуск В.А. Лебедев  
Компьютерная обработка: В.Д.Соколов

---

В печать 25.09.2014 г. Формат 60x84/16.  
Объем 24,8 усл. п. л. Заказ №615. Тираж 150 экз. Цена свободная  
Издательский центр ДГТУ  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
344000, г.Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1