

**Сборник материалов
II Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых и
студентов
«МЕТАЛЛУРГИЯ XXI СТОЛЕТИЯ
ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ»
28 мая 2025 г.**



Донецк 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

МЕТАЛЛУРГИЯ XXI СТОЛЕТИЯ

ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ

Сборник материалов
II Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых и студентов
28 мая 2025 г.

Донецк
2025

УДК 669(063)
ББК 34.3
М54

Рекомендовано к изданию
Советом факультета металлургии и теплоэнергетики
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
(протокол № 5 от 23.05.2025 г.)

Ответственный редактор – Асламова Яна Юрьевна

Редакционная коллегия:

Гнитиёв П. А. (председатель); Асламова Я. Ю.; Кочура В. В.; Бирюков А. Б.;
Егоров Н. Т.; Закарлюка С. В.; Заика В. И.; Пасечник С. Ю.; Салмаш И. Н.

М54

Металлургия XXI столетия глазами молодых : сб. материалов II
Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов, г. Донецк,
28 мая 2025 г. / Ред. кол.: Гнитиёв П. А. (пред.); Асламова Я. Ю.;
Кочура В. В. [и др.]; отв. ред. Я. Ю. Асламова. – Донецк : ДонНТУ,
2025. – Систем. требования: просмотрщик PDF-файлов. – Загл. с титул.
экрана.

В материалах сборника представлены результаты научных исследований и технических разработок в области современных металлургических и литейных технологий, обработки металлов давлением, материаловедения, металловедения и термической обработки металлов. Рассмотрены вопросы энергосберегающих технологий, теплоэнергетики, экологии и охраны труда в металлургии.

Издание предназначено для аспирантов, обучающихся вузов, научных и инженерно-технических работников металлургического профиля, а также всем интересующимся данной тематикой.

Тексты докладов печатаются в авторской редакции.

УДК 669(063)
ББК 34.3

© ФГБОУ ВО «ДонНТУ», 2025

Уважаемые студенты и молодые учёные!



II Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» посвящена 80-летию Победы в Великой отечественной войне.

В 2025 году конференция объединила молодых исследователей и студентов из 9 ведущих вузов страны, став площадкой для обмена знаниями и инновационными идеями в области металлургии и смежных технологий.

В этом сборнике представлены результаты актуальных научных исследований и технических разработок в ключевых направлениях: современные металлургические и литейные технологии, сварка, обработка металлов давлением, материаловедение, материаловедение и термическая обработка. Особое внимание уделено вопросам энергосбережения, химической технологии топлива, а также экологии, охране окружающей среды и безопасности труда на промышленных предприятиях.

Доклады систематизированы по следующим секциям:

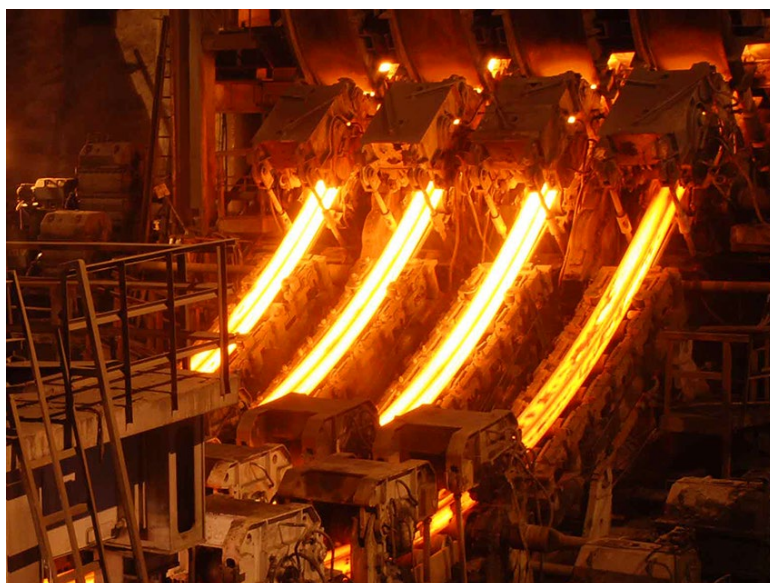
- *Металлургия черных металлов*
- *Цветная металлургия, литейное производство и сварка*
- *Обработка металлов давлением*
- *Материаловедение и технологии материалов*
- *Теплоэнергетика*
- *Экология, ресурсосбережение и охрана труда в металлургии*

Главная цель конференции и данного сборника — стимулировать обмен передовыми знаниями, активизировать исследовательскую деятельность молодых учёных и укрепить научное сообщество студентов.

Желаю всем участникам конференции вдохновения и настойчивости в научных поисках, которые вносят важный вклад в укрепление технологической независимости России и возрождение Донбасса как центра промышленного и научного потенциала. Пусть ваши исследования и разработки станут фундаментом для новых достижений и устойчивого развития нашей страны.

Декан факультета
металлургии и теплоэнергетики
Донецкого национального
технического университета,
доцент, к.т.н. Гнитиёв П.А.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЁРНЫХ МЕТАЛЛОВ



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОДУВКИ РАСПЛАВА В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

Бурин А.Н., Герцык С.И.
Московский политехнический университет

ТМК Ярцевский Metallургический завод является классическим металлургическим заводом небольшой мощности, работающим на металлическом ломе. В его состав входят два основных цеха — сталеплавильный и прокатный. Номинальная производительность предприятия составляет около 300 тыс. тонн арматуры в год.

Электросталеплавильный цех имеет одну дуговую сталеплавильная печь вместимостью 30 тонн, специализирующуюся на выплавке углеродистых конструкционных сталей Ст3; агрегат «ковш-печь» (АКП) для внепечной обработки железоуглеродистого полупродукта, полученного в ДСП; 2-ручьевую сортовую машину непрерывного литья заготовки сечением 125x125 мм, которая используется в качестве основного сырья для прокатного передела.

Изделия из конструкционных углеродистых сталей используются главным образом для изготовления деталей механизмов и конструктивных элементов в машиностроении и строительстве. Эти стали относятся к числу наиболее дешевых, из них получают до 70% всего проката — горячекатаного, сортового и фасонного толсто- и тонколистового, широкополосного и холоднокатаного тонколистового. Изделия, выполненные из таких сталей, обладают необходимыми эксплуатационными свойствами и обычно не нуждаются в дополнительной термической обработке.

Массовая доля (%) основных химических элементов стали Ст3 (ГОСТ 380-2005): Fe – 97%; C – 0,14-0,22%; Ni, Cu, Cr – каждый элемент не более 0,3%; Mn – 0,4-0,65%; Si – 0,05-0,17%; As менее 0,08%; S не более 0,05%; P менее 0,04%.

Печь ДСП-30Н2 оснащена водоохлаждаемым сводом с центральной огнеупорной частью и 11 водоохлаждаемыми элементами, установленными в боковой поверхности стен печи (рис. 1).

Печь снабжена тремя стеновыми и одной многофункциональной газокислородной фурмой-горелкой дверного типа мощностью 8 МВт, которые позволяют «подрезать» и расплавить шихту при ее зависании, вдувать в ванну кислород для окисления неметаллических включений и порошкообразный графит для вспенивания шлака, что позволяет снизить расход электроэнергии и длительность цикла плавки. В режиме горелки фурмы работают на природном газе с теплотворной способностью около $Q_H^p \approx 35,0$ МДж/м³ в течение начального периода плавки, длительность которого зависит от состава и качества металлошихты, которая практически полностью состоит из металлолома.

Технология выплавки конструкционных углеродистых сталей на ТМК – Ярцево является технологией выплавки на свежей шихте с окислением [1] и продувкой расплава кислородом. Плавка состоит из стандартных периодов:

заправка печи, завалка шихты, плавление, окислительный период, выпуск полупродукта.

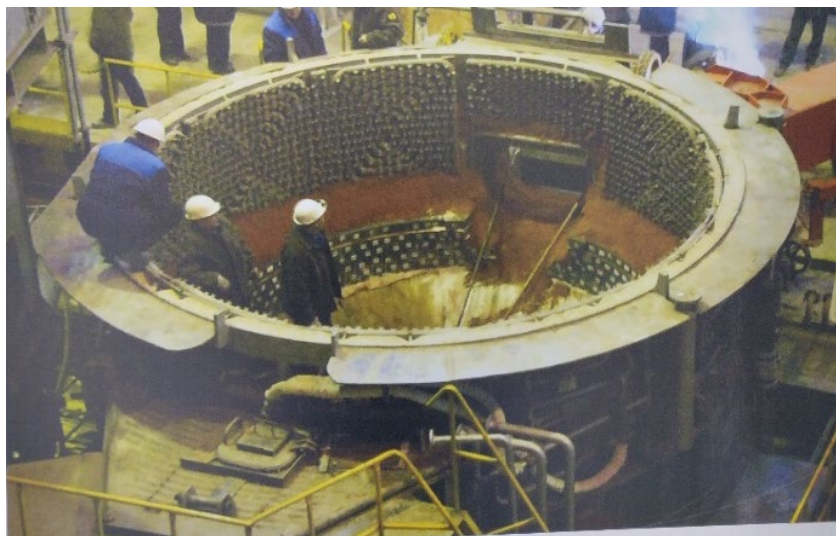


Рисунок 1 – Дуговая сталеплавильная печь со стеновыми водоохлаждаемыми элементами – рабочее пространство

После расплавления скачивают шлак и начинают окислительный период. Для обеспечения необходимой степени окисления компонентов шихты в рабочее пространство вводится газообразный кислород. Ввод газообразного кислорода в ДСП-30Н2 ЭСПЦ осуществляется через рабочее окно с помощью газо-кислородной фурмы и боковые стены – тремя стеновыми фурмами (рис. 2). Продолжительность окислительного периода невелика – в среднем около 18-22 мин.

Таблица 1 – Средний состав металлошихты, (% , масс)

Состав лома 3А	C	Mn	S	P	Cr	Ni	Si	O	Al	Fe
	0,3	0,25	0,035	0,03	0,10	0,05	0,20	0,05	0,001	98,98

В современных дуговых плавильных печах окислительный период осуществляют продувкой расплава через устройства, расположенные выше уровня зеркала ванны (фурма, манипулятор, инжектор), реже – с помощью расходуемой неохлаждаемой трубки, вводимой в печь через рабочее окно под уровень границы раздела металл-шлак [2]. В таких случаях зеркало расплава обдувается кислородом, так как фурмы располагаются над поверхностью жидкого металла и пары металла, отрываясь от нее, окисляются в атмосфере печного пространства и уносятся с уходящими газами в систему дымоудаления. В зоне контакта кислородной струи с поверхностью расплава выделяется большое количество теплоты за счет тепловых эффектов экзотермических реакций окисления. Процесс теплоусвоения ванной металла определяется теплотехническими и диффузионными процессами, зависящими от

теплофизических характеристик расплава (температуропроводность, теплоемкость). А так как величина этих параметров при температуре жидкой ванны невелика и не обеспечивает аккумуляцию выделяющейся теплоты, тем более, что конвективный теплообмен и массообмен в расплаве развит слабо, то температура в объеме металла характеризуется высокой степенью неравномерности и в зонах контакта струи с поверхностью расплава образуются локальные высокотемпературные зоны, на поверхности которых температура достигает температуры кипения металла, что приводит к его интенсивному испарению (угару) [3].



Рисунок 2 – Ввод кислорода оконной мультифурмой

Таким образом, не усвоенная расплавом теплота расходуется на испарение металла. Процесс в какой-то мере повторяет процесс периода расплавления, когда на поверхности жидкого металла под электродами образуются «горячие пятна» [4]. Образующиеся пары металла окисляются в атмосфере рабочего пространства и уносятся с уходящими газами в систему цеховой вентиляции. Кроме того, с ними уносятся и значительная часть кислорода, фактически не участвовавшая в процессе окисления примесей. Этими процессами объясняется высокий удельный расход кислорода, достигающий значений $30 - 50 \text{ м}^3/\text{т}$ для крупнотоннажных печей и около $25 - 35 \text{ м}^3/\text{т}$ для печей вместимостью до 50 т [5, 6].

Угар металла, достигает 2 – 4% от массы шихты – а это не только безвозвратные потери металла, но ухудшение экологической ситуации в цехе, поскольку пары металла выбиваются через неплотности боковых стен и свода печи, кроме того это еще серьезные потери теплоты.

Температура ванны в течение окислительного периода составляет $1590 - 1610 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что необходимо для обеспечения эффективного протекания процесса окисления углерода и интенсивного кипения ванны, необходимого для дегазации расплава и удаления неметаллических включений. К концу окислительного периода температура металла на $20 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры выпуска и достигает значений $1610 - 1640 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2 – Состав расплава в конце окислительного периода (% , масс)

C	Si	Mn	P	S	Cr	W	V	Mo	Fe
0,5	0,05	0,10	0,015	0,035	0,35	0,003	0,003	0,006	87,732

По итогам 2023-2024 г. после установки нового трансформатора, мощность которого $P = 38,5$ МВА, показатели окислительного периода при выплавке углеродистых конструкционных сталей СтЗсп с обычной продувкой были следующими (ранее печь работала с трансформатором мощностью $P = 26$ МВА):

Масса шихты, загружаемой в печь, т	35-42
Масса полупродукта на выпуске, т	35-37
Угар металла в окислительный период, т	2,0
Длительность продувки, мин	18
Общая продолжительность плавки, мин	47
Температура металла перед выпуском, °С	1640
Удельный расход кислорода, м³/т	25-35

С целью улучшения технико-экономических показателей работы печи, а именно: сокращения удельного расхода кислорода, длительности окислительного периода и плавки в целом, а также угара металла при выплавке стали СтЗ на ДСП–30Н2 в условиях мини завода «ТМК-ЯМЗ» продолжают работы по изменению системы продувки расплава кислородом, а именно, введение его с помощью оконной и стеновых фурм под уровень зеркала ванны на глубину, не вызывающую разрушения ее футеровки [3]. С использованием этого способа была проведена серия опытно-промышленных плавов (9 плавов), которые показали существенное снижение удельного расхода кислорода и сокращение угара металла (экспериментальные плавки проводились при оснащении печи трансформатором $P = 26$ МВА).

Таблица 3 – Новая технология окислительного процесса

№	Масса шихты, т	Масса полу-продукта, т	Время продувки, мин	Температура металла, °С	Удельный расход кислорода м³/т	Содержание основных элементов в расплаве, % (масс) (ост. Fe)				
						C	Mn	Si	P	S
1.	35,713	32,800	15	1637	12,9	0,1	0,084	0,001	0,017	0,032
2.	36,220	32,450	15	1657	13,1	0,09	0,08	0,001	0,005	0,029
3.	36,440	36,100	15	1599	14,2	0,1	0,079	0,004	0,007	0,028
4.	36,450	35,300	12	1627	15,2	0,04	0,056	0,001	0,01	0,026
5.	36,020	32,000	12	1604	14,9	0,05	0,047	0,001	0,006	0,021
6.	36,120	35,500	12	1612	14,9	0,04	0,049	0,001	0,007	0,021
7.	36,125	32,500	14	1626	12,7	0,071	0,07	0,002	0,007	0,04
8.	36,420	34,500	14	1632	13,2	0,08	0,059	0,001	0,006	0,031
9.	36,240	33,100	14	1638	13,3	0,07	0,07	0,001	0,008	0,030

Выводы. Технология продувки кислородом расплава в ДСП – 30Н2 в условиях мини завода «ТМК-ЯМЗ» г. Ярцево под уровень зеркала металла показала ее теплотехническую и экономическую целесообразность. Эффективность метода определяется снижением удельного расхода кислорода, электроэнергии, угара металла и сокращением общей продолжительности окислительного периода и плавки в целом.

Анализ химического состава расплава (экспериментальные плавки) дал возможность получить значения содержания основных элементов стали (%) – табл. 3 – все показатели в пределах нормативов. Получено, что удельный расход кислорода уменьшился на 30 – 40% при сокращении времени продувки и общей продолжительности плавки в целом. Кроме того, снизился угар металла окислительного периода.

Реализация новой технологии продувки расплава показала:

Угар металла в окислительный период, т	0,1
Средняя длительность продувки, мин	13
Общая продолжительность плавки, мин	42
Температура металла перед выпуском, °С	1640
Удельный расход кислорода, м ³ /т	12,5 – 15,3

Литература:

1. Дюдкин, Д.А. Процессы выплавки стали, внепечной обработки и непрерывной разливки. Т.1/Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко. Москва: Теплотехник (ТТ), 2008 – 528 с.
2. Каблуковский, А.Ф. Производство стали и ферросплавов в электропечах/ А.Ф. Каблуковский. Москва: «Металлургия», 1991 – 335 с.
3. Сосонкин, О.М. Патент №№ 2309182. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления/О.М. Сосонкин, С.И. Герцык, М.В. Шишимиров. Опубл. 27.10.2009 Бюл. №30
4. Владимиров, В.А. Определение размеров горячих пятен на поверхности жидкой ванны электродуговых печей/В.А. Владимиров, С.И. Герцык. Москва: Известия ВУЗов Черная металлургия, 1987, № 11, 51 – 54 с.
5. Макаров, А.Н. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. Библиотека электротермиста/А.Н. Макаров, А.Д. Свенчанский. Москва: Энергоатомиздат, 1992 – 96 с.
6. Воскобойников, В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия/В.А. Кудрин, А.М. Якушев. Москва: Металлургия, 2000 – 768 с.

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ГИДРАВЛИЗАЦИИ ПРИВОДА ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

Карпук А.В., Левченко Э.П., Левченко О.А.
Донбасский государственный технический университет

В контексте современных тенденций развития металлургической отрасли предъявляются строгие требования к характеристикам железорудного сырья, используемого в доменном производстве, а также к рациональному потреблению электроэнергии. В этой связи, оптимизация процесса дробления агломерата приобретает первостепенное значение для улучшения качества конечного продукта и снижения энергоёмкости [1, 2].

Принимая во внимание масштаб агломерационного производства, достигающий десятков миллионов тонн ежегодно, даже незначительное повышение эффективности дробления и улучшение гранулометрического состава готового агломерата может принести ощутимую экономическую выгоду для металлургического предприятия [3].

Одним из путей усовершенствования конструкции одновалковой дробилки является переход от традиционного механического привода вращения ротора к гидравлическому.

Анализ существующих конструкций дробилок [4–8] показывает, что двухвалковые дробилки практически не применяются для дробления агломерата в металлургии, а их внедрение требует значительных финансовых вложений. Щековые дробилки не обеспечивают эффективное разрушение агломерата из-за его высокой температуры, при этом энергия расходуется на упругую деформацию материала.

В связи с этим, одновалковые зубчатые дробилки представляются более предпочтительным решением, поскольку они широко используются в отрасли, а разрушение агломерата в них происходит главным образом за счет продавливания (среза) через колосниковую решетку, что является более энергоэффективным по сравнению с раздавливанием в щековых дробилках. Таким образом, модернизация конструкции одновалковых дробилок для устранения выявленных недостатков является актуальной практической задачей, стоящей перед инженерами-проектировщиками.

Гидравлический привод ротора одновалковой дробилки открывает новые возможности для управления процессом измельчения [9]. В отличие от механического привода, гидравлика обеспечивает плавное регулирование скорости вращения ротора, что позволяет адаптировать процесс дробления к различным характеристикам поступающего агломерата. Например, при увеличении твердости или крупности кусков можно автоматически снижать скорость вращения ротора для предотвращения перегрузок и снижения износа рабочих органов дробилки.

Кроме того, гидравлический привод позволяет реализовать функции автоматической защиты оборудования. В случае попадания в дробилку

недробимых включений, таких как металлические предметы, система может мгновенно остановить ротор или перевести его в реверсивный режим, предотвращая поломку дробилки. Такая защита существенно повышает надежность и долговечность оборудования, снижая затраты на ремонт и обслуживание.

Перспективы использования гидравлического привода связаны также с возможностью интеграции в систему автоматизированного управления технологическим процессом. Подключение датчиков и контроллеров позволяет в режиме реального времени отслеживать параметры процесса дробления, такие как мощность привода, давление в гидросистеме и гранулометрический состав продукта. На основе этих данных можно автоматически корректировать параметры работы дробилки для достижения оптимального результата.

В конечном итоге, внедрение гидравлического привода в одновалковые дробилки для измельчения агломерата представляется перспективным направлением повышения эффективности и надежности процесса подготовки железорудного сырья для доменного производства. Это позволит не только улучшить качество конечного продукта, но и снизить энергозатраты, а также повысить безопасность работы оборудования.

Расчётная схема гидравлического привода вращения ротора в одновалковой дробилке представлена на рисунке 1.

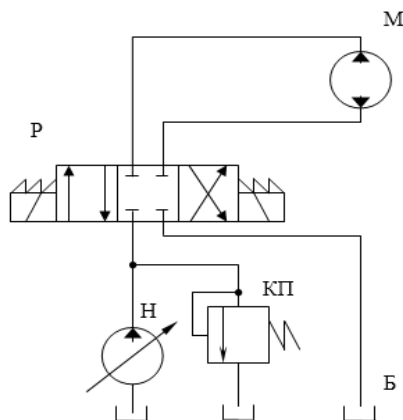


Рисунок 1 – Расчётная схема гидропривода вращения ротора в одновалковой зубчатой дробилке для исследования динамики

При разработке математической модели были сделаны следующие упрощения: значения модуля объёмной упругости, температуры, плотности, кинематической вязкости рабочей жидкости, а также коэффициенты расхода считаются неизменными и равными средним величинам; момент сопротивления предполагается постоянным; изменения момента инерции вращающихся компонентов не учитываются; давление на выходе гидромотора поддерживается постоянным; влияние волновых процессов в трубопроводах не рассматривается, так как трубопроводы имеют малую протяжённость; механический и гидравлический КПД принимаются постоянными и равными средним значениям.

Структурно-функциональная схема, основанная на уравнениях математической модели, изображена на рисунке 2. Её реализация в программном пакете позволяет решить поставленную задачу моделирования.

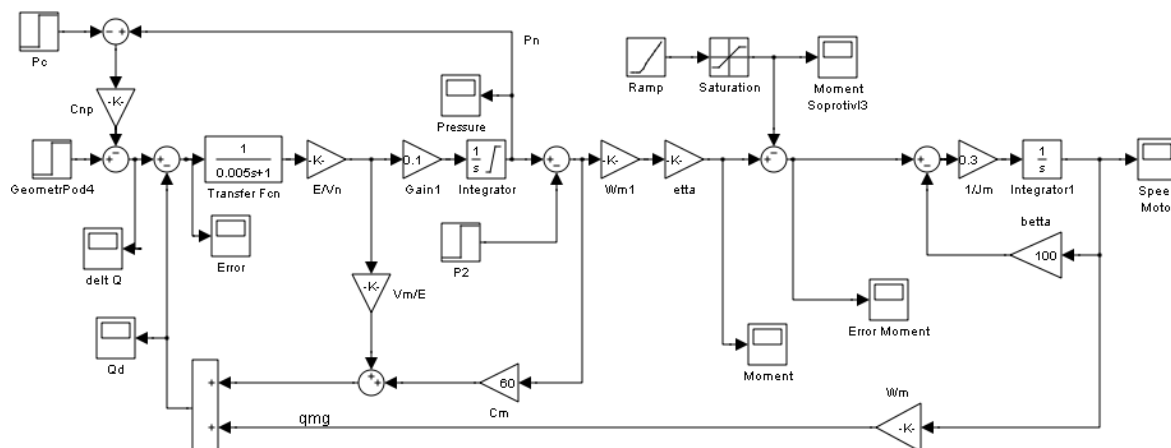


Рисунок 2 – Структурная схема модели гидропривода вращения ротора в одновалковой зубчатой дробилке

На рисунке 2 представлена схема решения задачи динамики, выполненная с использованием стандартных блоков пакета Simulink (соответствует схеме рис. 1). Наличие двух интеграторов указывает на второй порядок дифференциального уравнения, описывающего динамику системы. Блок с передаточной функцией служит для устранения алгебраической петли, возникающей из-за подачи на вход схемы давления, которое вычисляется далее в схеме. Для получения однозначного решения необходимо задать два начальных условия, исходя из физических свойств задачи. При моделировании разгона системы принимаются следующие начальные условия: $p_n(0)=0,1$ МПа (атмосферное давление), $\omega_m(0)=0$ (привод находится в состоянии покоя). Эти условия внесены в блоки интеграторов.

Иллюстрации на рисунке 3 демонстрируют графические зависимости параметров, характеризующих спроектированный гидравлический привод вращения ротора одновалковой зубчатой дробилки в фазе его ускорения. Процесс разгона анализируется, исходя из предпосылки линейного увеличения момента нагрузки M_c , ограниченного по величине, что отражено на графике $M_c(t)$. Давление p_n увеличивается с колебаниями на протяжении 0,4 секунды (за этот же период возрастает момент M_c). В стационарном режиме работы давление p_n стабилизируется на уровне 29,9 МПа. Угловая скорость гидромотора ω_m , также демонстрируя затухающие колебания, достигает установившегося значения 0,73 рад/с через 0,4 секунды, что соответствует номинальной величине. Анализ осциллограммы позволяет определить частоту колебаний, составляющую 12,5 Гц. Момент M_d , развиваемый гидромотором, увеличивается вместе с возрастанием нагрузки, проявляет колебательный характер и достигает своего установившегося номинального значения через 0,4 секунды.

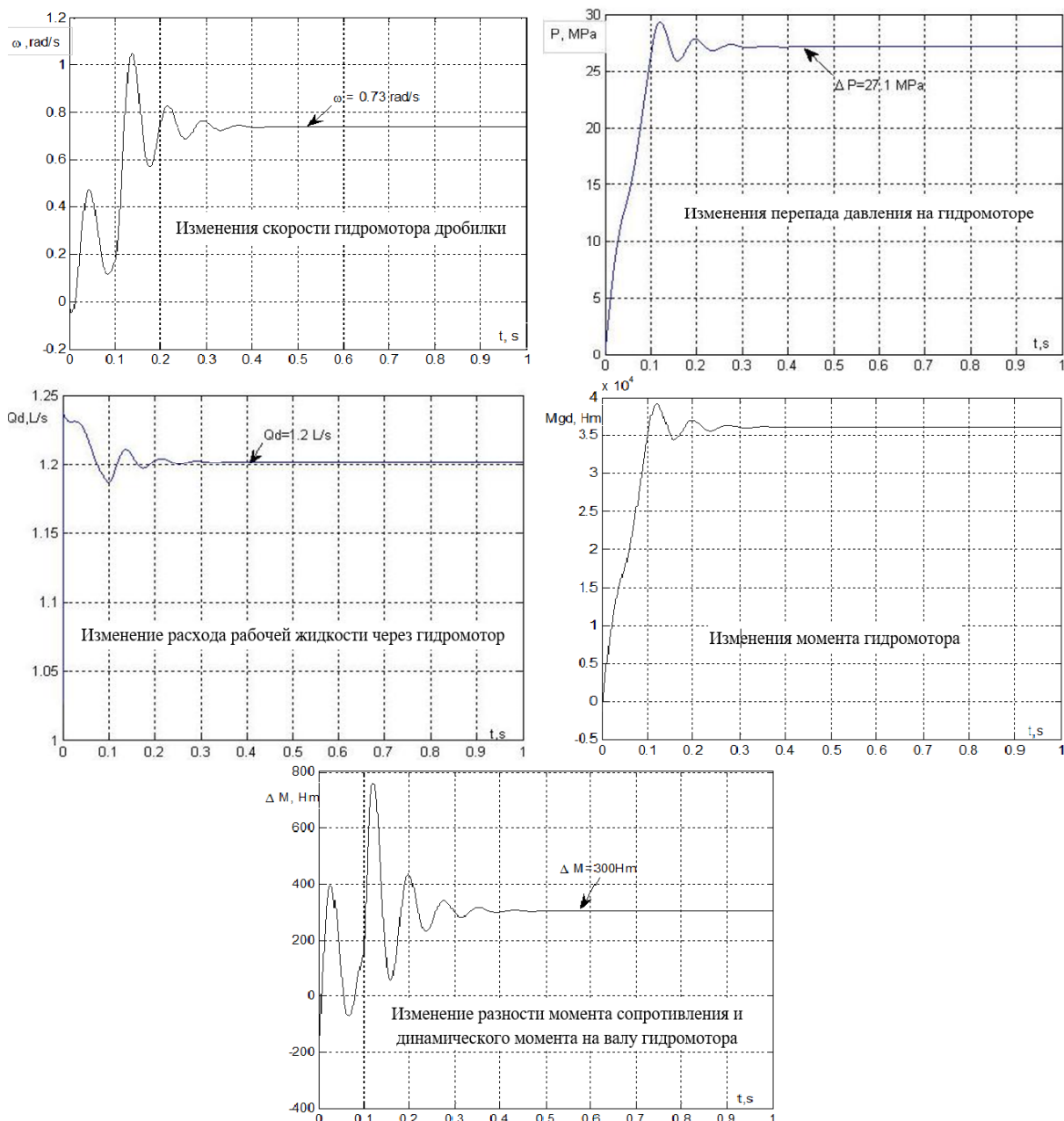


Рисунок 3 – Графические зависимости параметров, характеризующих спроектированный гидравлический привод

Начальный этап разгона характеризуется затухающими колебаниями, происходящими в течение 0,4 секунды. На частоту этих колебаний значительное влияние оказывают приведенный момент инерции привода и момент сопротивления нагрузки: увеличение J_{Σ} приводит к снижению частоты, а уменьшение J_{Σ} – к её увеличению.

Принимая во внимание колебательный характер переходных процессов, наблюдаемых в гидравлическом приводе, следует подчеркнуть необходимость автоматизации системы. В частности, требуется разработка автоматической системы стабилизации частоты вращения ротора одновалковой зубчатой дробилки.

Литература:

1. Левченко, О.А. Комплексные направления повышения качества агломерата и защиты природной среды / О.А. Левченко // Экология и промышленность России, 2006. – № 1. С. – 27–29.
2. Левченко, О.А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата / О.А. Левченко, Э.П. Левченко, А.М. Зинченко, В.В. Мороз. – Алчевск : ДонГТУ, 2016. – 190 с.
3. Левченко, О.А. Повышение эффективности дробления агломерата путем усовершенствования конструктивных параметров одновалковой зубчатой дробилки / Підвищення ефективності дроблення агломерату шляхом удосконалення конструктивних параметрів одновалкової зубчастої дробарки : специальность 05.04.00 "Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Левченко Оксана Александровна. – Донецк, 2009. – 22 с.
4. Мороз, В.В. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке / В.В. Мороз, Э.П. Левченко, Н.А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2016. – С. 271–275.
5. Мороз, В.В. Перспективы повышения эффективности доменной плавки путем стабилизации фракционного состава дробленого агломерата / В.В. Мороз, Э.П. Левченко, О.А. Левченко // Современная наука: исследования, технологии, проекты : Сборник V международной научно-практической конференции. – Москва: Научный центр "Олимп", 2015. – С. 484–489.
6. Власенко, Д.А. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет : Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки: 15.03.02, 15.04.02 – "Технологические машины и оборудование" / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, А.П. Жильцов, А.А. Харитоненко. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2023. – 140 с.
7. Мороз, В.В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки / В.В. Мороз, В.И. Рубежанский, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – № 7(50). – С. 153–158.
8. Власенко, Д.А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – № 3(13). – С. 9–16.
9. Левченко, Э.П. Проектирование гидропривода дробильно-измельчительных машин : Учебник для студентов направления подготовки 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, В.Г. Чебан [и др.]. – Алчевск : Донбасский государственный технический институт, 2022. – 316 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АГЛОМЕРАТА РАЗЛИЧНОЙ ОСНОВНОСТИ

Безмилицин С.С., Кузин А.В.

Донецкий национальный технический университет

Доменный процесс является очень энергоемким, поскольку затраты основного топлива плавки – кокса – в себестоимости чугуна достигают 35-40%. Поэтому доменщики стремятся снизить удельный расход кокса за счет применения ряда мероприятий. Одним из вариантов снижения расхода кокса является введение офлюсованного агломерата. Применение офлюсованного агломерата позволяет существенно улучшить работу доменных печей, а также частично или даже полностью вывести известняк из доменной шихты. Таким образом, поиск путей для совершенствования производства и использования офлюсованного агломерата в доменной плавке является актуальным вопросом.

По всей видимости, впервые офлюсованный агломерат получен в 1931 году в результате спекания богатой руды с добавкой 20% известняка. Полученный агломерат содержал 12% CaO и по прочности был сопоставим или даже превосходил на то время обычный агломерат [1].

Впервые офлюсованный агломерат внедрен в производственную практику на Магнитогорском металлургическом комбинате в 1948 году [2]. Первое промышленное получение и использование высокоосновного агломерата основностью CaO/SiO₂ около 3,5 ед. в доменной плавке было проведено в 1950-1953 годах, однако данный агломерат характеризовался повышенной, но кратковременной прочностью [3]. Проведенные позже исследования показали, что можно получить высокоосновный агломерат значительно прочнее обычного. Это может быть достигнуто как за счет определенных требований к качеству исходного сырья, так и технологии спекания [4].

В последние десятилетия повышается доля окатышей в доменной шихте. Однако, в большинстве случаев, отечественные окатыши имеют основность CaO/SiO₂ не более 0,5 ед. Это приводит к тому, что повышаются удельные расходы известняка и, как следствие, кокса. В связи с этим необходимо оценить изменение основных технико-экономических показателей доменной плавки.

Цель работы – оценить влияние введения агломерата различной основности на технико-экономические показатели доменной плавки.

В условиях аглофабрик можно производить офлюсованный агломерат из железорудного концентрата, агломерационной руды, железосодержащих металлургических отходов (колошниковая пыль, шламы доменного и сталеплавильного производств и др.), известняка, извести и твердого топлива (коксовая мелочь).

Для расчета, который осуществляли на 100 кг, задавались следующими исходными данными: химическим составом всех компонентов аглошихты; основностью агломерата; удельным расходом ряда материалов; содержанием FeO в агломерате.

Для упрощения расчета по заданным соотношениям концентрата, аглоруды и металлургических отходов и их химическому составу определяли средневзвешенный химический состав смеси. В качестве исходных данных принимали, что в железорудную часть аглошихты входят концентрат, аглоруда и отходы (колошниковая пыль, шламы) в соотношении соответственно 50, 15 и 35%, а также коксик в количестве 4,5 кг/100 кг агломерата. Химический состав исходных материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав компонентов аглошихты, %

Компоненты аглошихты	Fe	Mn	P	S	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	п.п.п
Концентрат	61,78	0,22	0,03	0,14	58,56	26,73	5,58	3,06	2,93	1,20	0,08	1,44
Руда	53	0,04	0,03	0,05	57,94	16	16	3	0,5	0,8	0,05	3
Отходы	40	0,1	0,05	0,2	46,03	10	12	3	10	1	0,1	5
Средневзвешенный состав ЖРМ	52,84	0,15	0,04	0,15	54,08	19,27	9,39	3,03	5,04	1,07	0,08	2,92
Известняк	0,12	–	0,01	0,01	0,18	–	0,89	0,37	54,40	0,68	0,03	43,44
Коксик	2,15	0,10	0,02	1,80	3,07	–	4,83	3,07	0,39	0,15	0,05	1,60

Расчет удельного расхода ЖРМ и известняка выполняли на основе данных о сухой массе компонентов аглошихты путем решения двух балансовых уравнений.

Уравнение материального баланса процесса спекания шихты, предложенное Ф.М. Базановым и И.Л. Малкиным [5], представлено в следующем виде:

$$\left(\frac{100-dx}{100}\right) \cdot x + \left(\frac{100-dy}{100}\right) \cdot y + \left(\frac{100-dz}{100}\right) \cdot z + A \cdot k + \left(\frac{100-d\phi}{100}\right) \cdot \phi + \left(\frac{100-du}{100}\right) \cdot u + \frac{1}{9} \cdot \left(\frac{x \cdot FeO_x}{100} + \frac{y \cdot FeO_y}{100} + \frac{z \cdot FeO_z}{100} - FeO_{agl} \right) = 1000$$

где x, y, z, k, ϕ, u – удельные расходы компонентов аглошихты, соответственно, концентрата, аглоруды, смеси железосодержащих отходов, твердого топлива, известняка, извести, кг/т агломерата; $dx, dy, dz, d\phi, du$ – потери при прокаливании соответственно, концентрата, аглоруды, смеси железосодержащих отходов, известняка, извести, %; A – зольность твердого топлива, доли единицы; FeO_x, FeO_y, FeO_z – содержание FeO в концентрате, аглоруде, железосодержащих отходах, %; FeO_{agl} – содержание FeO в 1 т агломерата, кг/т агломерата.

Уравнение баланса основности шихты $B=CaO/SiO_2$ для производства агломерата имеет вид:

$$B = \frac{x \cdot CaO_x + y \cdot CaO_y + z \cdot CaO_z + k \cdot A \cdot CaO_K + \phi \cdot CaO_\phi + u \cdot CaO_u}{x \cdot SiO_{2x} + y \cdot SiO_{2y} + z \cdot SiO_{2z} + k \cdot A \cdot SiO_{2K} + \phi \cdot SiO_{2\phi} + u \cdot SiO_{2u}},$$

где CaO_x , CaO_y , CaO_z , CaO_k , CaO_ϕ , CaO_u – содержание CaO, соответственно, в концентрате, аглоруде, смеси железосодержащих отходов, золе топлива, известняке, извести, доли единицы; SiO_{2x} , SiO_{2y} , SiO_{2z} , SiO_{2k} , $SiO_{2\phi}$, SiO_{2u} – содержание SiO_2 , соответственно, в концентрате, аглоруде, смеси железосодержащих отходов, золе топлива, известняке, извести, доли единицы.

Результаты расчета химического состава агломерата различной основности сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетный состав агломерата различной основности

Химсостав агломерата	Основность агломерата CaO/SiO ₂				
	1,2	1,5	2,0	3,0	4,0
Fe _{общ}	52,16	50,63	48,22	43,94	40,23
Fe ₂ O ₃	62,27	60,07	56,64	50,53	45,22
SiO ₂	9,57	9,34	8,98	8,34	7,78
Al ₂ O ₃	3,17	3,10	2,99	2,79	2,62
CaO	11,48	14,01	17,97	25,02	31,14
MgO	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16
MnO	0,198	0,192	0,183	0,167	0,154
P ₂ O ₅	0,088	0,087	0,085	0,081	0,078
S	0,011	0,011	0,011	0,010	0,010

В качестве базового периода был взят продолжительный пятимесячный (февраль-июнь 2012 г.) опыт работы доменной печи № 2 ДМЗ. Данный период характеризовался устойчивой работой доменной печи. Удельный расход кокса составил 471 кг/т чугуна при вдувании ПУТ в количестве 153 кг/т чугуна. Высокий расход известняка в количестве 232 кг/т чугуна при относительно умеренном выходе шлака в количестве 357 кг/т чугуна объясняется использованием в шихте окатышей СевГОК (1549 кг/т чугуна) основность CaO/SiO₂ равной 0,34 ед.

Проведены исследования по определению прочности окатышей на сжатие на испытательной машине типа МИИ-100. Испытанию на сжатие подвергли 24 партии окатышей (720 шт.). Результаты исследования следующие: прочность на сжатие – 222±75 кг/окатыш, минимум – 42 кг/окатыш, максимум – 448 кг/окатыш. Причем значение показателя прочности на сжатие менее 180 кг/окатыш имели 268 окатыша (37,2%), менее 200 кг/окатыш – 312 окатыша (43,3%), менее 220 кг/окатыш – 366 окатыша (50,8%). Приведенные данные свидетельствуют о нестабильной прочности окатышей СевГОК.

Для расчета замены части одного железорудного материала на другой, использовали программу, разработанную на кафедре РТПиМТ ФГБОУ ВО «ДонНТУ». Программа предназначена для расчета технологических и технико-экономических показателей доменной плавки. Она включает:

- материальные балансы железа и шлакообразующих;
- проектные расчеты при изменении расходов и химических составов шихты.

Расчеты выполнены по принципу материальных балансов доменной плавки при сохранении приходной части железа и постоянства основности доменного шлака. При заданных расходах и химических составов компонентов шихты рассчитываются расходы искомого железорудного компонента, кокса, флюса, выхода шлака и его состава, содержание марганца и фосфора в чугуна, производство. В базовом расчете определяется материальный баланс по компонентам. Исходные данные из окна базового расчета автоматически перепостятся в окно проектного расчета. В окне проектного расчета, изменяя расходы одного или нескольких компонентов шихты или их химические составы, можно получить расход искомого компонента. Искомый компонент отмечен в окне базового расчета «радио-кнопкой». Окно сравнительных расчетов включает расходы компонентов шихты, выделенные в окне базового расчета «флажками», а также перечисленные выше показатели.

По указанной выше методике был выполнен расчет замены части окатышей СевГОК агломератом различной основностью в количестве 350 кг/т чугуна (табл. 3).

Таблица 3 – Расчет основных показателей доменной плавки при введении агломерата различной основностью

Наименование показателей	База	Введение агломерата основностью				
		1,2	1,5	2,0	3,0	4,0
Производительность, %	100	100	100,6	101,6	103,5	105,1
Кокс, кг/т чугуна	471	471	468	463	455	447
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	1549	1254	1263	1277	1301	1323
Агломерат, кг/т чугуна	0	350	350	350	350	350
ПУТ, кг/т чугуна	153	153	153	153	153	153
Температура дутья, °С	946	946	946	946	946	946
Кислород в дутье, %	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
Флюс, кг/т чугуна	232	197	180	152	103	61
Выход шлака, кг/т чугуна	357	393	392	390	386	383
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24

Из расчета видно, что при замене части окатышей СевГОК агломератом основностью от 1,2 до 4,0 ед. в количестве 350 кг/т чугуна производительность печи возрастает на 0-5,1%, расход кокса снижается на 0-24 кг/т чугуна, расход флюса уменьшается на 35-171 кг/т чугуна. Обращает на себя внимание увеличение выхода шлака с 357 до 393-383 кг/т чугуна, что объясняется применением более бедным по содержанию железа агломерата. Данные расчета коррелируют с производственными данными ЕМЗ [6].

Для качественной оценки изменения стоимости 1 т, выплавленного чугуна при введении в доменную шихту 350 кг высокоосновного агломерата за счет вывода части окатышей СевГОК, нет необходимости рассчитывать все статьи затрат: достаточно оценить изменение по статьям затрат железорудные материалы, флюсы, топливо (табл. 4).

Таблица 4 – Оценка изменения себестоимости чугуна при введении агломерата различной основностью

Материалы, кг/т чугуна	Цена, руб/т	Расход материалов, кг/т чугуна					
		Базовый период	Расчетные периоды				
Окатыши СевГОК	10625	1549	1254	1263	1277	1301	1323
Агломерат осн 1,2	9350	0	350	0	0	0	0
Агломерат осн 1,5	9265	0	0	350	0	0	0
Агломерат осн 2	9180	0	0	0	350	0	0
Агломерат осн 3	9010	0	0	0	0	350	0
Агломерат осн 4	8840	0	0	0	0	0	350
Кокс	18700	471	471	468	463	455	447
Известняк	4250	232	197	180	152	103	61
Изменение себестоимости чугуна, руб/т чугуна	—	0	-10	-73	-166	-329	-483

Как видно из табл. 4, замена части окатышей СевГОК агломератов основностью от 1,2 до 4 ед. позволяет получить снижение себестоимости от 10 до 483 руб/т чугуна.

Таким образом, показано, что при замене части окатышей СевГОК агломератом основностью от 1,2 до 4,0 ед. в количестве 350 кг/т чугуна производительность печи возрастает на 0-5,1%, расход кокса снижается на 0-24 кг/т чугуна, расход флюса уменьшается на 35-171 кг/т чугуна, себестоимость снижается на 10-483 руб/т чугуна. Обращает на себя внимание увеличение выхода шлака с 357 до 393-383 кг/т чугуна, что объясняется применением более бедным по содержанию железа агломерата.

Литература:

1. Люйкен, К. Новейшие исследования агломерации железных руд // Домез. – 1932. – № 7. – С. 28-31.
2. Банных, А.М. Самоплавкий агломерат и работа на нем доменных печей / А.М. Банных, А.П. Якобсон // Сталь. – 1953. – № 4. – С. 283-285.
3. Ярхо, Н.А. Получение агломерата с высоким содержанием оснований / Н. А. Ярхо Н. М. Якубцинер, В. Е. Йоффе // Сталь. – 1954. – № 6. – С. 453-455.
4. Утков, В. А. Поведение агломерата высокой основности в доменной печи / В. А. Утков, В. Я. Миллер // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1961. – № 12. – С. 26-32.
5. Базанов, Ф.М. Расчет агломерационных шихт / Ф.М. Базанов, И.Л. Малкин. – Москва : Metallургия, 1964. – 63 с.
6. Мищенко, И.М. Технология производства высокоосновного агломерата в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода и возможные способы ее совершенствования / И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, Н.С. Хлапонин и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – № 8. – С. 790-802.

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кучеренко Л.Э., Левченко Э.П., Левченко О.А.
Донбасский государственный технический университет

В эпоху технологической цивилизации, опирающейся на машинное производство, прогресс и создание инновационного оборудования и технологических решений в металлургии играют ключевую роль в обеспечении устойчивого развития данной отрасли. От успехов металлургии напрямую зависит развитие и других сфер человеческой деятельности.

В Донбасском государственном техническом университете, который создавался для подготовки специалистов и проведения научных исследований в интересах металлургического производства города Алчевска и всего Донбасского региона, этим вопросам всегда уделялось повышенное внимание.

Особое внимание уделялось развитию физической основы, технологии и системы дробления и измельчения, что привело к созданию роторно-ударной дробилки РУД-10 с тросовым виброизолятором подвески ротора, предназначенной для среднего и мелкого дробления материалов размером до 100 мм до фракции 10 мм. Производительность дробилки достигает 10 т/ч при мощности привода 55 кВт (рис. 1а, рис. 2.б) [1, 2].

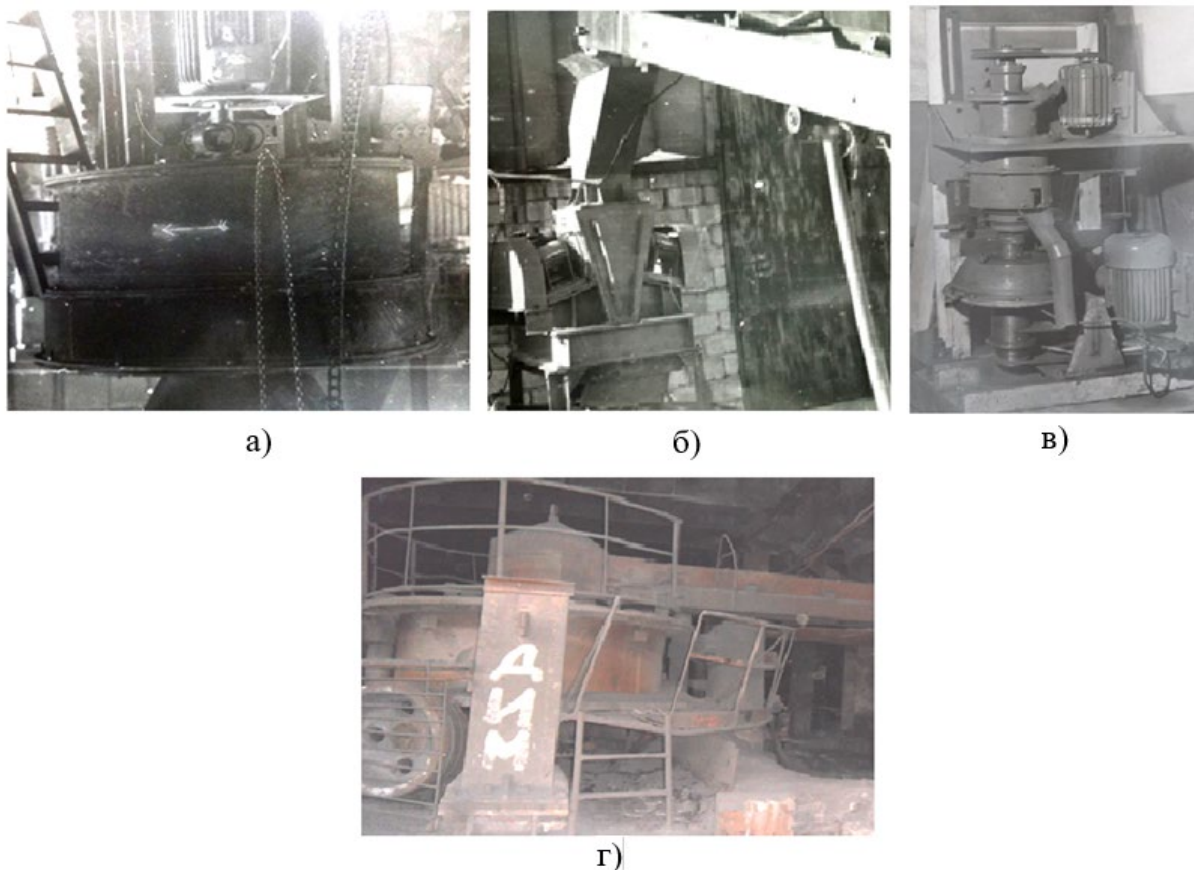


Рисунок 1 – Опытные образцы дробильно-измельчительного оборудования

Агрегат самоизмельчения УС-1 (рис. 1б) предназначен для осуществления мелкого дробления сырья с начальным размером частиц 80-100 мм до фракции 0–5 мм. Производительность установки составляет 3 тонны в час [3].

Данное оборудование успешно апробировано в процессе измельчения кокса, используемого для создания лёточной массы при заделке леток доменных печей. В ходе испытаний было подтверждено получение коксика необходимого гранулометрического состава.

Многоступенчатая роторная мельница МР-62, обеспечивающая тонкое измельчение твёрдых материалов до фракции 50 мкм с производительностью до 150 кг/ч, характеризуется стабильностью параметров крупности, которая практически не зависит от физико-механических свойств перерабатываемого материала. Это достигается за счёт предварительной калибровки исходного сырья по размеру частиц [4]. Мельница может применяться автономно, а также в составе комплекса для пробоподготовки (рис. 1в), используемого для лабораторных анализов качества железорудного сырья в агломерационном производстве.

Комплекс пробоподготовки позволяет в автоматизированном режиме осуществлять обработку проб для спектрального анализа посредством предварительного дробления железной руды, её сокращения и последующего тонкого измельчения до требуемой фракции, улавливаемой рукавным фильтром.

Многощелевая дисковая дробильно-измельчительная машина ДИМ-6 [5, 6] успешно применяется для вторичной переработки и регенерации огнеупорного шамотного кирпича на производстве доменного цеха Алчевского металлургического комбината (рис. 1г).

В настоящее время продолжается работа по совершенствованию одновалковой зубчатой дробилки с целью улучшения однородности гранулометрического состава готового агломерата путём внесения минимальных изменений в её конструкцию [7, 8]. На основе разработки и исследований физических моделей одновалковой зубчатой дробилки (рис. 2в) для приготовления товарного агломерата для доменных печей с повышенной стабильностью фракционного состава существенно повышается эффективность выплавки чугуна. При этом в скиповом агломерате достигается практически полное отсутствие пылевых частиц с размерами менее 5 м и кусков больших размеров, что способствует удешевлению плавку за счёт экономии дорогостоящего кокса.

С целью получения качественного стального абразива для обработки поверхностных дефектов чугунных и стальных отливок проводятся исследования физической модели роторно-ударного измельчителя [9, 10], реализующего способ стеснённого удара (рис. 2а). Это позволяет производить колотую стальную дробь остроугольной формы с энергозатратами значительно низкими, чем в традиционно применяемой для данной дели барабанной мельнице, обладающей пониженный коэффициентом полезного действия.

Колотая дробь является более эффективной, обладает повышенными абразивными свойствами и пользуется значительным спросом [11].

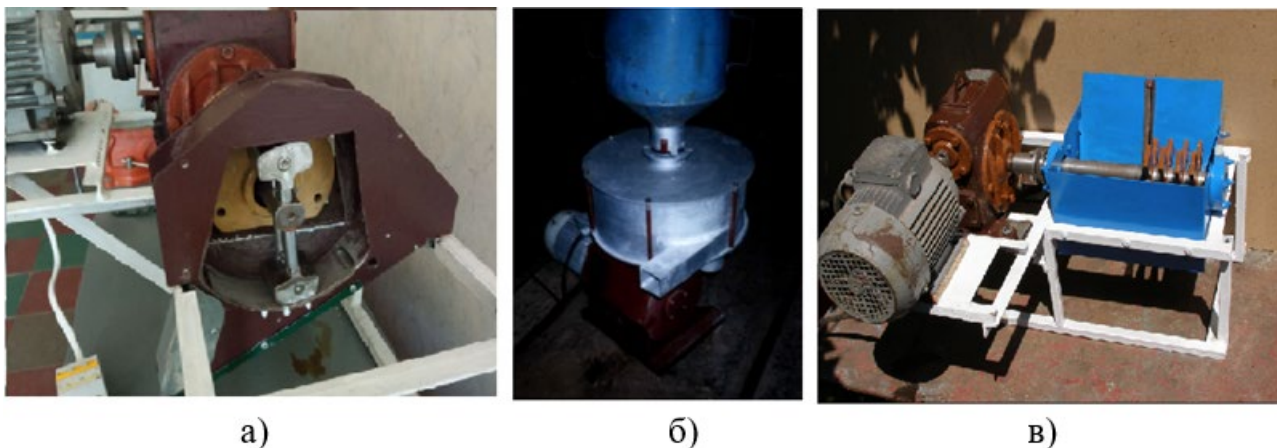


Рисунок 2 – Физические модели дробильно-измельчительных машин

По указанным направлениям ведутся широкие разносторонние исследования, составляющие основы как для студенческих выпускных квалификационных работ, так и для подготовки кадров высшей квалификации на основе защиты диссертаций на соискание научных степеней кандидата и доктора технических наук.

Рассмотренные технические разработки формируют основу для повышения эффективности технологических процессов в металлургии, могут служить базой для её технического перевооружения и стимулировать дальнейшие научно-технические исследования и разработки, в том числе с возможностью применения в других отраслях промышленности с широким участием молодёжи в проектировании и исследовании современных металлургических машин.

Литература:

1. Левченко, Э.П. Интенсификация технологического процесса измельчения зерна на комбикорм в центробежно-ударной мельнице : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Левченко Эдуард Петрович. – Луганск, 2001. – 21 с.
2. Левченко, Э.П. Проектирование гидропривода дробильно-измельчительных машин : Учебник для студентов направления подготовки 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, В.Г. Чебан [и др.]. – Алчевск : Донбасский государственный технический институт, 2022. – 316 с.
3. Зинченко, А.М Технические решения в области проектирования, изготовления и эксплуатации металлургических машин и агрегатов в ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ" Зинченко А.М., Мороз В.В., Левченко Э.П., Изюмов Ю.В.,

Левченко О.А. В сборнике: Инновационные перспективы Донбасса. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. 2019. – С. 90–94.

4. Филатов, М.А. Электромагнитный способ измельчения материалов и его применение для пробоприготовления в агломерационном производстве / М.А. Филатов, Э.П. Левченко, И.А. Карпук [и др.] // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета, 2019. – № 16(59). – С. 47–52.

5. Левченко, О.А. Комбинированные дробильно-измельчительные машины и возможности их применения для измельчения отходов шамотного кирпича Левченко О.А., Левченко Э.П., Зинченко А.М. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета, 2011. – № 33. – С. 171-197.

6. Левченко, Э.П. Перспективы развития конструкций дисковых дробильно-измельчительных машин комбинированного действия / Э.П. Левченко, Д.А. Вишневский, А.М. Зинченко [и др.] // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : Сборник тезисов докладов VII научно-технической конференции с международным участием. – Алчевск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донбасский государственный технический университет", 2023. – С. 7–9.

7. Левченко, О.А. Комплексные направления повышения качества агломерата и защиты природной среды / О.А. Левченко // Экология и промышленность России, 2006. – № 1. С. – 27–29.

8. Левченко, О.А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата / О.А. Левченко, Э.П. Левченко, А.М. Зинченко, В.В. Мороз. – Алчевск : ДонГТУ, 2016. – 190 с.

9. Павлиненко, О.И. Аналитические приёмы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дробы стеснённым ударом / О.И. Павлиненко, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2019. – № 15(58). – С. 106–112.

10. Патент № 2729155 С1 Российская Федерация, МПК В02С 17/00. Способ разрушения материалов стесненным ударом : № 2019127706 : заявл. 02.09.2019 : опубл. 04.08.2020 / О.И. Павлиненко, А.П. Жильцов, В.Г. Чебан, О.А. Левченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Липецкий государственный технический университет". – 5 с.

11. Акимова, О.И. Инновационные направления в разработке и проектировании роторно-ударных измельчителей : Для специалистов литейного производства, а также студентов машиностроительных специальностей / О.И. Акимова, Э.П. Левченко, Д.А. Власенко. – Вологда : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Инфра-Инженерия", 2024. – 120 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Хаджинов Е.А., Кочура В.В.

Донецкий национальный технический университет

Известно, что мероприятия, способствующие интенсификации сгорания пылеугольного топлива (ПУТ) определяют повышение величины его оптимального расхода, коэффициента замены кокса углем, эффективности пылеугольной технологии, а также являются важнейшими компонентами комплексной компенсации нарушений, определяемых горением ПУТ и снижением доли кокса в шихте. Увлажнение дутья и повышение концентрации кислорода в зоне горения ПУТ являются эффективными интенсификаторами горения.

Наличие водяного пара в дутье обеспечивает повышение концентрации окислителя на поверхности частицы углерода, поэтому влияние его идентично влиянию кислорода. Однако, интенсификация горения при введении в дутье пара определяется не только и даже не главным образом изменением указанного соотношения [1].

В работе [2] с помощью моделирования процесса горения пылевидной коксовой частицы и влияния водяного пара в топочном объеме на процесс горения, установлено, что повышение содержания в топочном объеме водяного пара несущественно влияет на динамику выгорания коксовых частиц, но снижает их температуру и теплоту сгорания топлива.

Присутствие паров воды также положительно влияет на степень черноты фурменной зоны и тепловой режим горна доменной печи [3,4].

Однако в основном все исследования в данной области проводились либо теоретически, либо с помощью моделирования. Поэтому в данном исследовании была поставлена задача по экспериментальному изучению влияния паров воды на скорость горения коксовой частицы.

Для этого была использована экспериментальная установка, разработанная ранее на базе Приазовского государственного технического университета, совместно с Институтом Газа НАН Украины. Описание экспериментальной установки подробно приведено в работе [5].

Опыты проводились на фракциях графита: 1,6-2,0; 1,0-1,2; 0,8-1; 0,315-0,5; 0,2-0,25 и 0,16-0,2 мм. Для устранения влияния разброса размеров частицы для каждой фракции проводилось 30 опытов, после чего результаты подвергались статистической обработке. При этом относительное среднеквадратическое отклонение результата измерения времени горения частицы, не превышало 3 %.

Измерения проведены на газовых смесях O_2/N_2 (воздух), O_2/H_2O (26% и 47% объемных H_2O) и чистом кислороде. Расход кислорода и воздуха измерялся с помощью ротаметров. Получение смеси O_2/H_2O осуществлялось в термостате, который поддерживал заданную температуру с точностью 1 К. Кислород из баллона подводился в колбу с подогретой дистиллированной

водой, где он насыщался парами воды в нужной пропорции и затем, полученная смесь по обогреваемому газопроводу подавалась в рабочее пространство печи. Нагретая до заданной температуры печи газовая смесь, через отверстие в реакторе направлялась на частицу топлива. Контроль соотношения O_2/H_2O осуществляется по температуре воды в колбе термостата.

Результаты экспериментальных исследований.

Данные по удельной скорости сгорания одиночных частиц графита были получены при сгорании частиц в смеси H_2O и O_2 с объемным содержанием O_2 в диапазоне 53-100 %. Размер фракций графитовых частиц варьировался от 0,16 до 2 мм. Влияние диаметра частиц на удельную скорость сгорания представлено на рис. 1 (а).

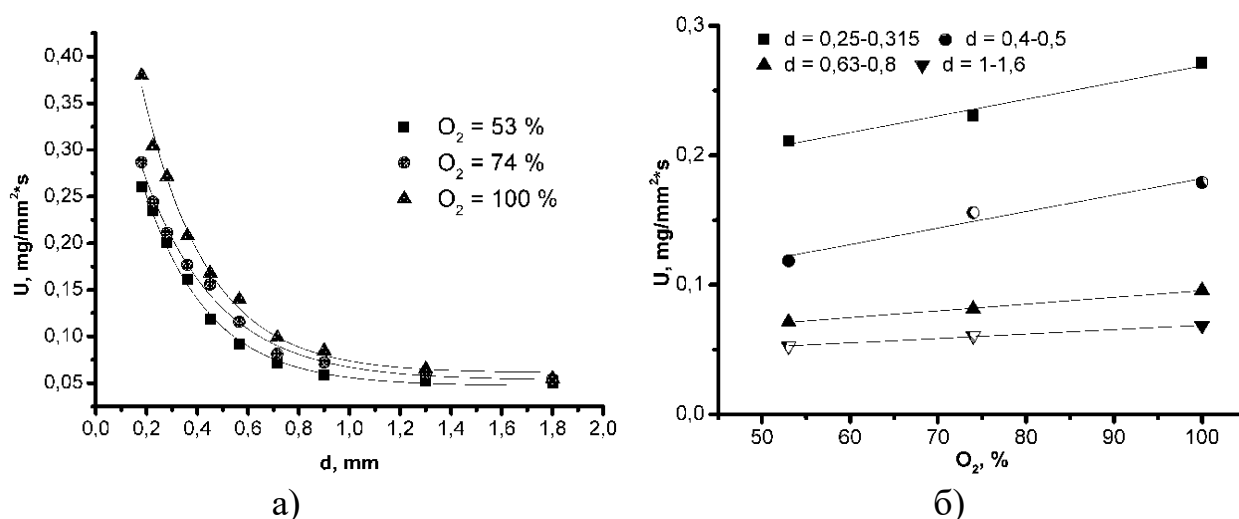


Рисунок 1 - Зависимость удельной скорости сгорания частиц графита в среде O_2/H_2O от размера частиц (а) и от концентрации O_2 в смеси (б)

Полученные данные по удельной скорости сгорания были аппроксимированы с помощью степенной функции. Как видно из рисунка 1 (а), эмпирические точки хорошо ложатся на кривые аппроксимации. Подобный вид зависимости характерен также для сферических частиц твердого топлива, сгорающих в среде O_2/N_2 при диффузионном режиме горения [6]. Это свидетельствует о том, что режим горения в условиях эксперимента также является диффузионным или близким к нему. Количественные отличия в скорости сгорания частиц в различных средах будут рассмотрены ниже.

Влияние концентрации O_2 в окислительной смеси особенно сильно проявляется на фракциях менее 0,3 мм. На крупных же фракциях (>1 мм) оно слабо ощутимо. В целом, как видно из рис. 1 (б), зависимость удельной скорости сгорания от концентрации O_2 в газовой фазе носит линейный характер, что говорит о первом порядке реакции [7]. Авторами [8] также было обнаружено, что процесс газификации угля паром развивается как реакция первого порядка.

Выводы. В ходе работы были проведены экспериментальные исследования процесса горения частиц графита в среде O_2/H_2O при следующих параметрах: фракционный диапазон частиц 0,16-2 мм, температура в реакционной зоне 900-1150 °С, концентрация кислорода в смеси 43-100 %. Замена инертного газа в окислительной атмосфере на H_2O , в отличие от CO_2 , приводит к интенсификации реакции и увеличению реакционной способности топлива. Экспериментально установлено, что относительная реакционная способность графита в среде O_2/H_2O на 19 % выше, чем в среде O_2/N_2 . Влияние концентрации O_2 на удельную скорость сгорания в окислительной смеси O_2/H_2O носит линейный характер и особенно сильно проявляется на фракциях менее 0,3 мм. На крупных же фракциях (>1 мм) оно слабо ощутимо.

Литература:

1. Ноздрачев, В.А. Перспективные технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива и кислорода / В.А. Ноздрачев, С.Л. Ярошевский, В.П. Терещенко. - Донецк, Новый мир, 1997. - 173 с. : ил.
2. Крутов, Ю.М. Моделирование горения пылевидной коксовой частицы в присутствии водяного пара / Ю.М. Крутов, Д.В. Решетняк, И.И. Токарев // Энергосбережение. Энергетика. Аудит. – 2013. - №5 – С.47-57.
3. Ярошевский, С.Л. Влияние пылеугольного топлива на степень черноты фурменной зоны и тепловой режим горна доменной печи / С.Л. Ярошевский, Ю.Л. Курбатов, И.В. Мишин и др. // Metallurg. – 2013. – №4. – С. 48-53.
4. Рубан, Е.Ю. Методика расчета теплотехнических процессов в фурменной зоне доменной печи при подаче пылеугольного топлива / Е.Ю. Рубан // Донецк: Вестник ДонНТУ – 2018. - №4(14) – С.78-83.
5. Хаджинов, Е.А. Экспериментальное исследование кинетики сгорания одиночных угольных частиц / Е.А. Хаджинов, Б.И. Бондаренко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2013. – Вип. 26. – С. 121–128.
6. Khtami, R. Combustion behavior of singles particles from three different coal ranks and sugarcanebagasse in O_2/N_2 and O_2/CO_2 atmospheres / Khtami, C. Stivers, K. Joshi, Y.A. Levendis, A.F. Sarofim. // Comb. and Flame. – 159. – 2012. – p.1253-1271.
7. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. – М.: Изд. Академии наук СССР, 1958. – 600 с.
8. Есин, О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Часть 1 / О.А. Есин, П.В. Гельд. – М.: Metallurgizdat., 1950. – 511с.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ ШЛАКА ЭШП, КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛЕ

Куливар Д.Р., Заика В.И.

Донецкий национальный технический университет

Электрошлаковой переплав (ЭШП) является одним из рафинирующих переплавов, позволяющих эффективно очищать металлы от таких вредных примесей как сера, кислород и неметаллические включения. Высокая химическая и структурная однородность электрошлакового металла предопределяют высокий уровень эксплуатационных свойств изготовленных изделий.

Однако, в связи со спецификой технологии электрошлакового переплава такая вредная примесь как водород не только не удаляется, но в большинстве случаев поступает в металл из атмосферы и шихтовых материалов сверх равновесной её концентрации, что резко ухудшает качество металла.

Существующие методы борьбы с этим явлением, как правило, основаны на ограничении содержания водорода и влаги в основных шихтовых и вспомогательных материалах, а также предотвращения доступа водяных паров в печное пространство в период плавки. Эти мероприятия, как показала практика, являются недостаточно эффективными. Поэтому весьма актуальной является задача создания такой технологии ЭШП, которая позволит снижать содержание водорода до безопасного для качества металла уровня.

В этом плане перспективными, на наш взгляд, являются работы открывающие возможности разработки методов управления содержанием водорода в металле путём изменения градиента окисленности по высоте шлаковой ванны.[1,2] Показано, что в системе газ–шлак–металл концентрация водорода в жидком шлаке и металле находится в термодинамическом равновесии с атмосферой и зависит от парциального давления водорода в газовой фазе.

В рассматриваемой системе при ЭШП всегда существует концентрация кислорода по высоте шлакового слоя. По этой причине парциальное давление кислорода в шлаке P_{O_2} будет отличаться от парциального давления кислорода на границах жидкого шлака с металлом и атмосферой.

Термодинамическая оценка и выбор оптимальных условий снижения водорода в процессе ЭШП показал, что поток водорода в указанной высшей системе направлен попутно инициирующему потоку кислорода, а создаваемый при этом градиент химического потенциала водорода противоположен по знаку градиенту химического потенциала кислорода.

В работе [2] установлена зависимость, связывающая концентрацию водорода в металле, находящимся под оксидным шлаком, с парциальным давлением водорода в газовой фазе:

$$C_{[H]} = K_H * P_{H_2}^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{P_{O_2}^1}{P_{O_2}^2}\right)^{1/4} \quad (1)$$

где $C_{[H]}$ - концентрация водорода в фазе;

K_H – коэффициент пропорциональности, зависящий от состава фазы и температуры;

PO_2^1 и PO_2^2 – парциальное давление кислорода в шлаке и его границах с атмосферой и жидким металлом соответственно;

P_{H_2} – парциальное давление водорода.

Из зависимости (1) следует, что равновесная с атмосферой концентрация водорода в металле СШП возможна лишь при отсутствии градиента окисленности по толщине шлакового слоя. В условиях реальных плавов он определяется одновременно протекающими процессами его удаления и поступления в металл. Также следует, что если $PO_2^1/PO_2^2 < 1$ или $PO_2^1 < PO_2^2$, что возможно в случае окисления поверхности шлака, то будет наблюдаться удаление водорода из металла.

В настоящей работе проверялись экспериментально способы раскисления (окисления) различных слоев шлаков в процессе ЭШП и выявления связи с изменением содержания водорода в металле.

В качестве объекта исследования на лабораторном эксперименте была выбрана шарикоподшипниковая сталь марки ШХ15.

Переplав проводили на печи ЭШП У-578 на кафедре «Электрометаллургия» ДонНТУ. В медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диам. 300мм переплавляли штанги стали ШХ 15 с содержанием водорода $5,0 - 5,5 \cdot 10^{-4}\%$, кислорода $2,2 - 4,5 \cdot 10^{-4}\%$. Флюсы различного состава перед плавками расплавлялись в графитовом тигель – ковше. Скорость наплавления слитков поддерживали в пределах $2,5 - 3,0$ кг/мин. Абсолютная влажность воздуха при переплаве составляла $12-15$ г/м³.

Пробы жидкого металла отбирали в процессе переплава кварцевыми трубками, закачивали в воде и помещали в эвдиометры с глицерином с последующим определением водорода методом вакуум-плавления на эксхалографе ЕА-1 фирмы «Бальцерс» и суммирования полученных результатов. На этом же приборе определяли содержание кислорода.

Поверхность шлака раскисляли различными углерод-содержащими материалами: боем граффитированных электродов, древесным углем, коксом, техническим углеродом марок ПМ-15 и ПМ-100. Для преимущественного окисления нижних слоев шлака применяли металлизированные окатыши с плотностью $4-5$ г/см³ и содержанием FeO 15,2 вес.%. Кроме того, в объем шлака в медной фольге вводили навески окарины или заполняли окариной стальные трубки диам. 15 мм, которые преваривали к электроду. Используемые методики позволили поддерживать следующие уровни окисленности шлака и металла и межфазных границ. Окисленность шлака у его границы с жидкой металлической ванной – $PO_2 = 10^{-9} - 10^{-11}$ атм, окисленность шлака, контактирующего с углеродными материалами. $PO_2 = 10^{-13} - 10^{-15}$ атм, а окисленность шлака на границе с атмосферой - $PO_2 = 10^{-1}$ атм.

Подачу в кристаллизатор раскислителей и окислителей начинали после отбора первой пробы жидкого металла на газовый анализ, на отдельных плавках – после ввода окислителя. При раскислении углеродными материалами поддерживали полное закрытие ими поверхности шлака.

Технические параметры экспериментальных плавов отражены в таблице 1. Результаты полученных данных приведены на рисунках 1,2,3.

Таблица 1 – Технологические параметры экспериментальных плавов

№ плавов	Состав флюса	Раскислитель			Окислитель		Содержание оксидов железа в конечном шлаке, FeO, вес. %
		Состав раскислителя	Кол-во углеродных материалов	Кол-во металлических раскислит. кг/т	Состав окислителя	К-во окислителя в пересчете на O ₂ кг/т	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	АНФ-6	графит	20	-	-	-	не опр.
2	"	кокс + Mg	15	1,5	-	-	0,94
3	"	кокс + Al	15	1,5	-	-	0,87
4	"	кокс	15	-	-	-	1,15
5	"	Al	-	1,2	окатыши	0,4	1,23
6	"	ПМ-15	10	-	-	-	0,51
7	"	"	10	-	окатыши	0,2	0,76
8	АНФ-7	ПМ-15	10	-	-	-	0,36
9	АНФ-27	графит	20	-	-	-	0,52
10	"	ПМ-15 + Mg	10	1,5	окатыши	0,9	0,53
11	"	графит	20	-	Fe ₃ O ₄	0,4	1,99
12	"	"	20	-	"	0,2	1,99
13	АНФ-6	графит	20	-	"	0,2	0,53
14	"	ПМ-100	5	-	-	-	0,44
15	АНФ-27	"	5	-	-	-	0,47
16	"	ПМ-100	5	-	Fe ₂ O ₃	0,3	0,51

Общей закономерностью, наблюдаемой на большинстве плавов, является резкое изменение характера кривых распределения водорода по высоте слитков в сравнении с обычным ЭСП. Это свидетельствует о сильном влиянии неоднородной окисленности шлака на поведение водорода при ЭСП.

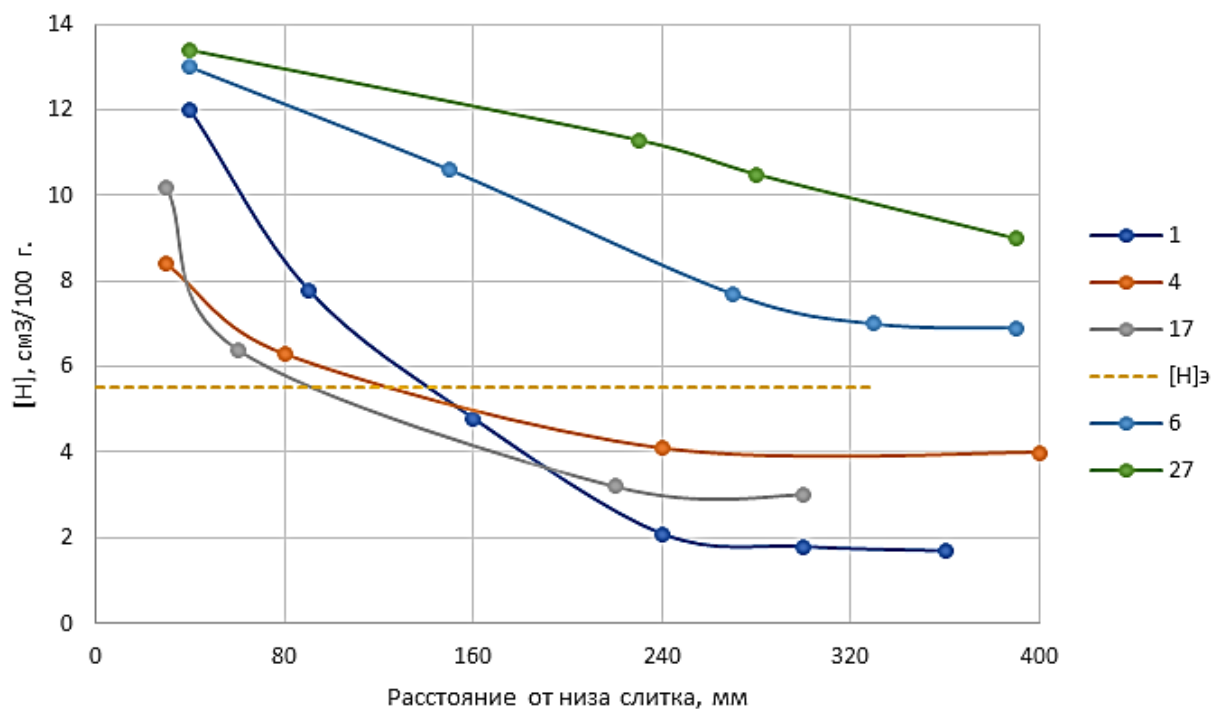


Рисунок 1 – Распределение водорода по высоте слитков ЭШП при вводе в кристаллизатор раскислителей и окислителей

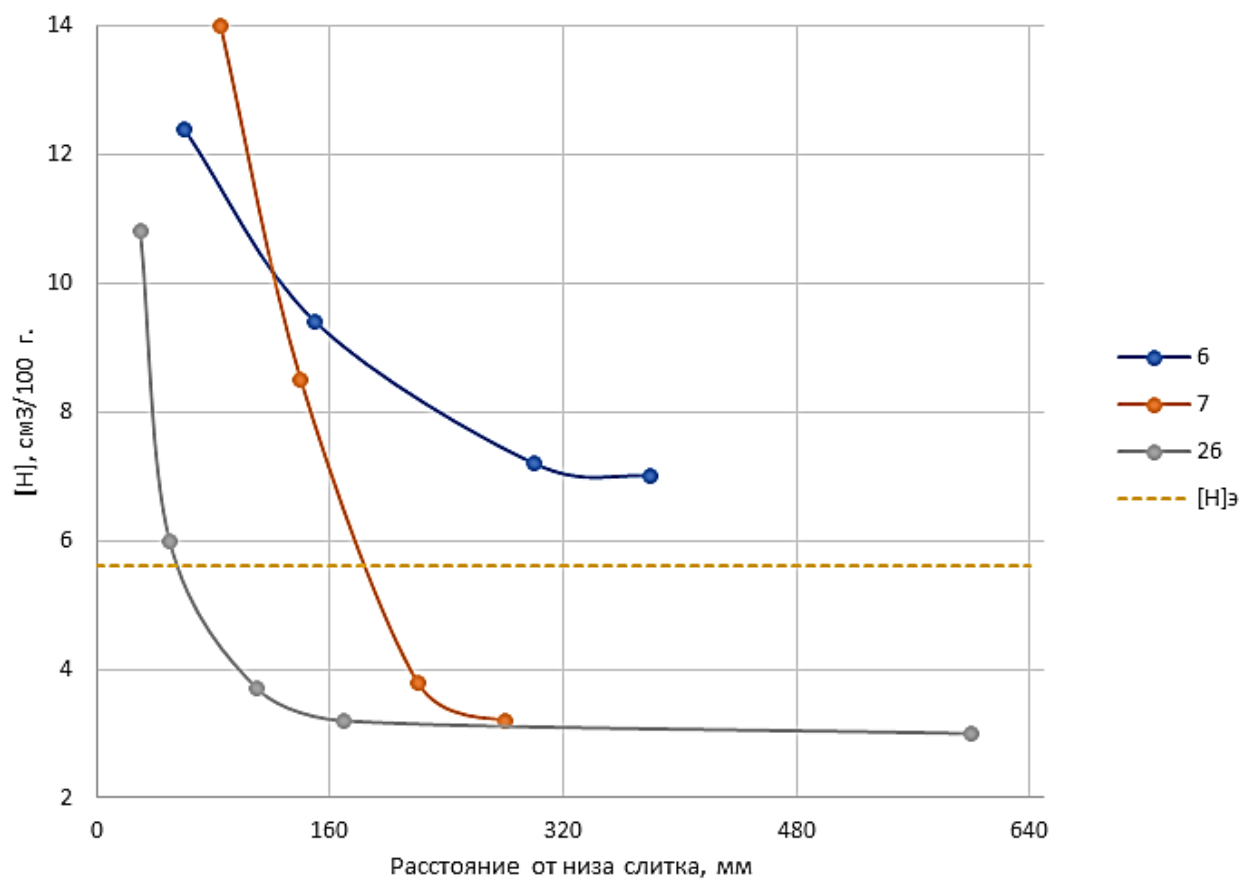


Рисунок 2 – Распределение водорода по высоте слитков ЭШП, полученных при раскислении шлака сажей ПМ-15

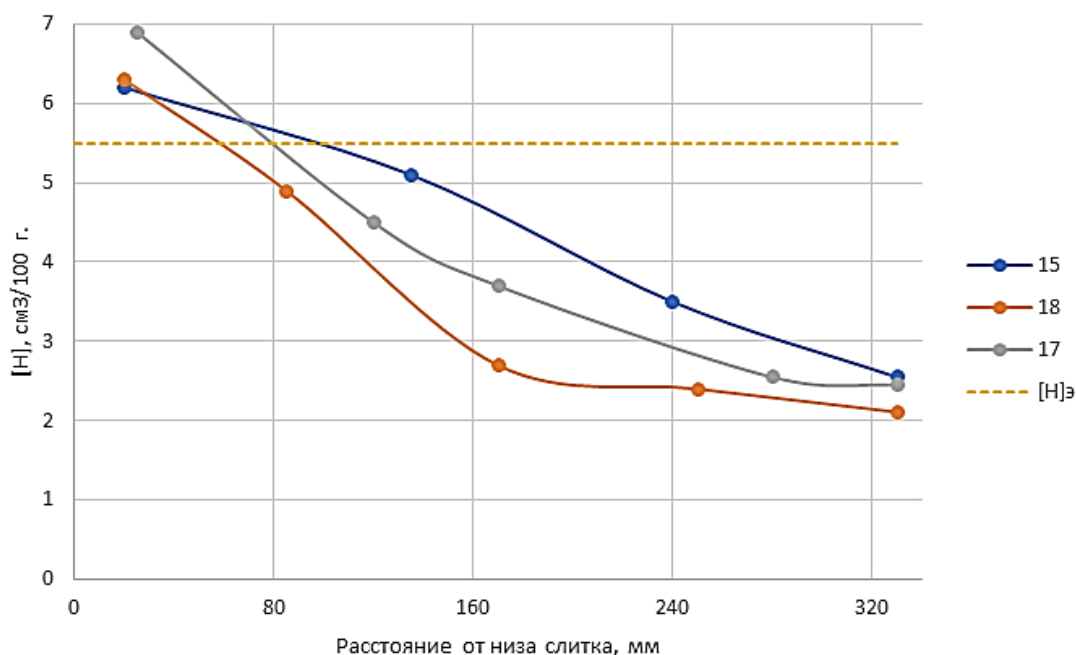


Рисунок 3 – Распределение водорода по высоте слитков ЭШП, полученных с раскислением шлака коксом и сажей ПМ-100

В поверхностном высокоокисленном слое шлака плавки 27 (рис.3) хорошо растворяется водород. Градиент концентрации и поток кислорода по толщине шлакового слоя, направленный в сторону металлической ванны обуславливает накачку водорода из поверхностного слоя шлака в металл сверх его равновесной концентрации.

При раскислении поверхности шлака углеродными материалами, на поверхности шлака, контактирующего с углеродом $P_{O_2} = 10^{-13} - 10^{-15}$ атм, а в шлаке на его границе с жидким металлом $P_{O_2} = 10^{-9} - 10^{-11}$ атм. Этот градиент окисленности направлен в противоположную, (по сравнению с обычным ЭШП) сторону и создаёт в системе потоки, приводящие к существенному рафинированию металла от водорода (пл. 1,4,14, рис.3). Как видно из рис. 1 при раскислении шлака различными углеродными материалами только раскисление сажей ПМ-15 (пл.6) не приводит к снижению концентрации водорода ниже исходной в электроде. По-видимому, это явление обусловлено снижением окисленности шлака на этой плавке в связи с графитизацией сажи и науглероживанием объема шлака, не только её поверхности, что способствует снижению величины градиента окисленности шлака. Влияние окисленности объема шлака на полноту удаления водорода из металла подтверждается результатами плавов (рис.2). Так на плавках 6 и 7, проведённых с окислением поверхности шлака сажей ПМ-15, увеличение скорости и полноты удаления водорода на плавке 7 объясняются повышением окисленности шлака за счёт подачи в шлак металлизированных окатышей. Если в процессе раскисления поверхности шлака происходит его науглероживание, то эффект от повышения окисленности шлака наблюдается только в начале плавки.

Малая склонность к графитизации сажи ПМ-100, наряду с её высокой раскислительной способностью, позволяет создать в шлаке устойчивый градиент окисленности, что приводит к стабильному удалению водорода на протяжении всей плавки (рис.3). Определяющим звеном, которое предотвращает поступление водорода из атмосферы в шлак является тонкий раскисленный слой поверхности шлака, которой практически непроницаем для водорода. Важным условием существования такого слоя является непрерывное и эффективное раскисление шлака на его поверхности, что достигается полным покрытием шлака слоем раскислителя.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты подтверждают теоретические данные, что в процессе ЭШП кроме известных факторов, влияющих на содержание водорода в металле, необходимо также учитывать степень окисленности металла и особенно, шлака.

Выводы.

Таким образом, одной из существенных причин, обуславливающих поступление водорода в металл, является существование естественного градиента окисленности шлакового слоя, а также величина окисленности объема шлаковой ванны.

Условиями удаления водорода в процессе электрошлакового переплава является создание по толщине шлака слоя градиента окисленности, обратного естественному и поддержание достаточной окисленности объема шлака.

Указанные условия достигаются путём эффективного раскисления в процессе переплава поверхности шлаковой ванны и введением в её объем окислов железа в виде металлизированных окатышей.

Литература:

1. Григорян, В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин-М.:Металлургия 1979-255с.
2. Пономаренко, А.Г. Термодинамика металлургических шлаков с учётом их электронного строения. Диссерт. на соискание учёной степени д.т.н. / А.Г. Пономаренко - М.: МиСиС, 1976.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 4Х5МФС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭШП

Огарок П.О., Заика В.И.

Донецкий национальный технический университет

Машиностроение является ведущей отраслью народного хозяйства, определяющей технический прогресс. Развитие машиностроения предполагает увеличение доли штамповки для изготовления ответственных заготовок и изделий. Применение штамповых изделий ограничено свойствами сталей, применяемых для изготовления штампового инструмента, которые должны обладать высокой прочностью и пластичностью, хорошей износостойкостью и обрабатываемостью. Это вызывает необходимость в широком ассортименте штамповых сталей, имеющих высокое содержание легирующих элементов. Большое количество марок сталей и малотоннажность партий затрудняет поставки металла по кооперации между предприятиями, а высокое содержание дефицитных легирующих ограничивают поставки. В связи с этим для многих машиностроительных предприятий важнейшей задачей является повышение качества поставляемых сталей и разработка технологии получения сталей в условиях своего предприятия при обеспечении их высокого качества.

Способ выплавки сталей оказывает существенное влияние на стойкость штампового инструмента. Опыт эксплуатации штампов горячего деформирования показывает, что во многих случаях преждевременный выход из строя и их низкая разгаростойкость объясняется низкой пластичностью и вязкостью стали. Повышение служебных свойств металла можно обеспечить повышением чистоты металла по таким примесям, как сера, кислород, цветные металлы. Одним из путей повышения чистоты металла и его пластичности является электрошлаковый переплав.

Металл ЭШП, в отличие от металла открытой выплавки, имеет более высокую химическую и структурную однородность [1], что обеспечивает повышение механических свойств штамповых сталей. Высокие показатели свойств штамповой стали после переплава позволяют применять её в литом состоянии без пластической деформации. При этом литой штамповый инструмент имеет более высокую стойкость, чем инструмент, изготовленный из поковок открытой выплавки.

Другим перспективным направлением улучшения качества металла и его служебных свойств является применение модификаторов, в качестве которых обычно используют щелочноземельные (ЩЗМ) и редкоземельные металлы (РЗМ).

Введение кальция в сталь приводит к глобуляризации и измельчению оксидных включений [2], что снижает опасность зарождения трещин и их распространение. В работе [3] показано, что ввод кальция приводит к

уменьшению протяженности зоны столбчатых кристаллов и размеров дендритов стали 30Л.

Широкое применение в качестве модификаторов находят редкоземельные металлы. Ввод церия в литой металл приводит к связыванию серы в оксисульфидные включения глобулярной формы [4], снижает развитие дендритной структуры [5], уменьшает величину зерна и измельчает карбидную фазу.

Совместное влияние электрошлакового переплава и модифицирующего эффекта редкоземельных элементов изучено в работе [6]. Установлено, что ввод церия уменьшает степень ликвации легирующих элементов, улучшает структуру металла, повышает механические свойства и стойкость штамповой стали 4Х5МФС. Однако, не установлено оптимальное количество РЗМ, обеспечивающее максимальное повышение комплекса свойств и стойкости штамповых сталей.

Целью данной работы являлась разработка технологии выплавки штамповой стали 4Х5МФЭ с использованием модифицирующих элементов по ходу плавки в процессе ЭШП на установке ЭШП 30-26.

Выплавку заготовок штампового инструмента проводили переплавом расходуемого электрода в водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 140 мм под флюсом АНФ-6. Переплав проводили на твердом старте. Напряжение переплава составляло 40-42 В, а ток 2,5-3,0 кА.

Ввод модификаторов проводили при переплаве электродов, изготовленных из четырёх сваренных между собой штанг проката стали 4Х5МФС диаметром 36 мм.

Дроблённые модификаторы (силикокальций СК-30 и ферроцерий) фракцией 10-15 мм вводили порциями с помощью дозатора типа ДН-21 в плавильное пространство непосредственно на шлак в соответствии с формулой:

$$\frac{C_{max}-C_{min}}{C_{max}} = \frac{V_H \cdot \Delta\tau}{m_{ст}} \quad (1)$$

C_{max} и C_{min} - максимальное и минимальное содержание легирующих элементов в отливке;

$\Delta\tau$ - время подачи порций мин;

$m_{ст}$ - масса жидкой металлической ванны в стационарный период плавки.

Дозаторы типа ДН-21 позволяют подавать легирующие материалы в количестве 0,05-1,0 т/ч при точности дозирования 1,5%. Они могут работать в двух режимах – объёмного и весового дозирования.

Расход модификаторов и их содержание в отливке приведено в таблице 1.

Как видно из приведенных данных, разработанная технология легирования модифицирующими элементами позволяет получить их требуемое содержание и обеспечить стабильность усвоения от плавки к плавке в промышленных условиях.

Таблица 1 – Расход модификаторов и их содержание в металле в зависимости от варианта выплавки

№ п/п	Количество отливок	Модификатор	Расход модификаторов, кг/т	Содержание в отливке %
1	6	Силикокальций СК-30	5,0	0,0013-0,0018
2	6	Силикокальций СК-30	10,0	0,0024-0,0032
3	6	Ферроцерий (50% Се)	2,5	0,018-0,024
4	6	Ферроцерий (50% Се)	5,0	0,035-0,042

Легирование полупродукта стали 45Х1, до стали 4Х5МФС проводили в процессе переплава электродов диаметром 75 мм. Ввод дробленых легирующих материалов (лигатуры Х1) в кристаллизатор по ходу плавки проводили с помощью дозатора ДН21-С в режиме весового дозирования.

Установлено, что при производительности дозатора 8,5-9,5кг/ч химический состав стали соответствует ГОСТ 5950-73 и при этом обеспечивается равномерное распределение легирующих в объеме слитка (табл.2).

Таблица 2 – Распределение элементов в отливке

Место отбора пробы	Содержание легирующих элементов, %							
	С	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P
Верх	0,38	0,53	1,23	5,38	1,6	0,36	0,007	0,025
Средина	0,40	0,53	1,2	5,35	1,5	0,35	0,008	0,025
Дно	0.40	0,53	1,2	5,30	1,5	0,30	0,007	0,025

Проверка в промышленных условиях стабильности воспроизведения химического состава отливок при оптимальных режимах плавки показала хорошую сходимость с опытными данными (табл. 3).

Таблица 3 – Химический состав отливок, полученных методом легирования при ЭШП

Кол-во отливок	Содержание элементов в отливках, %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
14	0,38-0,41	0,8-1,15	0,39-0,53	4,5-5,4	1,5-1,68	0,40-0,61	0,006-0,008	0,020-0,027

Выводы.

1. Разработана технология легирования металла с помощью дозирующих устройств, обеспечивающая получение необходимого химического состава стали.

2. Модифицирование штамповой стали 4Х5МФС кальцием и церием позволяет повысить качество металла. Ввод модификаторов в оптимальных количествах (0,003% Са и 0,04% Се) позволяет повысить стойкость прошивного инструмента, в среднем, от 40 до 70%.

Литература:

1. Медовар, Б.И. Электрошлаковый металл /Б.И. Медовар, Л.М. Ступак, А. Г. Бойко и др.: Под редакцией Б.Е. Патона, Б.И. медовара - Киев: Наукова думка, 1983.-680с.
2. Цукович, Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений / Г.М. Цукович. - М.: Металлургия, 1981. - 296с.
3. Ершов Г.С. Микронеоднородность металлов и сплавов. / Г.С. Ершов, Л. А. Поздnek - М.: Металлургия, 1985. - 214с.
4. Завьялов, А.С. Машиностроительные стали с редкоземельными присадками / А.С. Завьялов, М.М. Сандомирский - Л.: 1969. - С. 62-65.
5. Крещаковский, Н.С. Медифицирование стали / Н.С. Крещановский, М. Ф. Сидоренко - М.: Металлургия, 1970. - 296с.
6. Коваль А.Е., Лямцев К.К., Конрад Ю.Г. О свойствах и работоспособности литых штамповых сталей электрошлакового переплава // Проблемы специальной электрометаллургии: Реси. межвед, сб. АН УССР. — Киев, 1982. – Вып. 16. – С. 23-29.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛА ОТЛИВОК КОЛЕС ШЛАМОВЫХ НАСОСОВ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

Назарюк В. Ю., Симоненко В.И.
Донецкий национальный технический университет

Материалом для исследования служили образцы легированных чугунов: ИЧХ13 и Г300. В нашей работе образцы сравнивались с эталонным образцом Ст20, который имеет заведомо более низкую износостойкость. Испытания на абразивный износ производили в соответствии с требованиями ГОСТ 30480-97 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость» по схеме трения образца о незакрепленный абразив. Ознакомиться с методикой можно в работе [1].

По полученным данным была построена линейная модель регрессии, которая прогнозировала относительную истираемость в зависимости от химического состава образцов. Данными для обучения модели послужили данные работы [1].

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции химических элементов на значение К от Ст20 первой модели

	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Ti	V	C
Коэффициент	-0,84	-0,653	0,848	-0,852	-0,613	-0,268	-0,277	-0,33	-0,376	-0,84

$$K \text{ от ст20} = \beta + \frac{([C\%] * C_{\text{коэф}}) + ([Si\%] * Si_{\text{коэф}}) \dots ([Fe\%] * Fe_{\text{коэф}})}{100} \quad (1)$$

где: β – свободный член = 0,9;
[элемент%] – содержание элемента в составе.

Таблица 2 – Результаты относительной износостойкости образцов

Марка стали	Kn от ст20	Среднее значение К от Ст20	Прогноз К от Ст20
ИЧХ13	2,8	2,55	2,74
ИЧХ13	2,5		
ИЧХ13	3,29		
ИЧХ13	1,61		
Г300	4,53	4,14	3,27
Г300	3,77		
Г300	4,12		

Исходя из полученных результатов, можно отметить, что показатель относительной износостойкости образца Г300 выше образца ИЧХ13 в 1.6 раза. Отклонение значений измерений, относительно прогнозного расчета в среднем=16,92%.

С целью получить более достоверную прогнозную модель, была просчитана вторая модель, которая учитывает зависимость удельной истираемости от реального химического состава каждого образца. Был проведен химический анализ образцов на установке «Искролайн-100».

Методом наименьших квадратов получили коэффициенты линейной корреляционной зависимости удельной износостойкости от химического состава, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты линейной корреляционной зависимости удельной износостойкости от химических элементов составов

Элемент	У пер	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni	Fe
Коэффиц	70,8	-0,963	-2,4	-0,335	-0,820	-0,622	-0,648	-0,7

Для расчета этой модели была использована следующая формула:

$$\Delta P = Y_{\text{пересечения}} + ([C\%] * C_{\text{коэф}}) + ([Si\%] * Si_{\text{коэф}}) \dots ([Fe\%] * Fe_{\text{коэф}}) \quad (4)$$

Где: $Y_{\text{пересечения}}$ – свободный член = 70,8276

Построенная модель прогнозирует удельную истираемость, которая затем **переводиться** в значение относительной истираемости К от ст20 [1].

Таблица 4 – Полученные при моделировании данные и их расхождение с фактическими данными

	ИЧХ564	ИЧХ4,4	ИЧХ562	ИЧХ563	ИЧХ567	ИЧХ575	ИЧХ13	Г300
Факт Кот20	5,020	3,626	4,224	3,897	4,718	4,404	2,377	4,117
Прогн Кот20	5,431	4,091	4,552	4,115	5,023	4,875	2,415	4,551
Расх-е, %	7,578	11,360	7,204	5,305	6,080	9,665	1,555	9,525

Выводы.

По полученным данным видно, что вторая модель демонстрирует ошибку в среднем 7,28%, что значительно лучше предыдущей модели, где ошибка составляла 16,92%. Для достижения большей точности необходимо увеличить базу исходных данных для обучения модели.

Литература:

1. Назарюк, В.Ю. Сравнительные испытания материала отливок колес шламовых насосов на абразивный износ / В.Ю. Назарюк, В.И. Симоненко // «Металлургия XXI столетия глазами молодых» 28-29 мая 2024 года. – С. 14-15.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНЫ В ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Шедловский Д.В., Асламова Я.Ю.
Донецкий национальный технический университет

Рациональная технология загрузки шихты на агломашины является ключевым элементом обеспечения эффективности и качества агломерационного производства. Современные металлургические предприятия сталкиваются с необходимостью оптимизации процессов для повышения выхода годного продукта и снижения энергозатрат. В условиях растущих требований к экологичности и экономичности производства особое значение приобретает совершенствование методов формирования слоя шихты на агломашине. Настоящий доклад посвящен анализу современных представлений и достижений в области рациональной технологии загрузки шихты, а также рассмотрению практических аспектов ее реализации на современных аглофабриках.

Первые, не потерявшие смысла и сегодня, общие соображения о рациональной технологии загрузки шихты на агломашину были опубликованы инженером С.М. Мееровым еще в 30-ые годы прошлого столетия [1]. В них подчеркнута необходимость обязательного применения защитного слоя постели, а также укладки шихты таким образом, чтобы содержание твердого топлива в верхних горизонтах слоя было максимальным, а объемная плотность шихты не возрастала, обеспечивая повышенную порозность, а значит - и газопроницаемость слоя шихты.

Последующие опытно-промышленные исследования [2, 3] существенно дополнили и расширили упомянутые представления о рациональной технологии загрузки агломерационной шихты.

В новых исследованиях [4, 5] подробно освещены процессы сегрегации шихты, предложены методы их количественной оценки, показаны дополнительные варианты регулирования скорости спекания шихты по ширине агломашины, представлены результаты влияния рациональной загрузки шихты на основные параметры и показатели производства агломерата.

Важно подчеркнуть цели применения рациональной технологии загрузки шихты на агломашины. К ним, как правило, относятся: повышение прочности, выхода годного агломерата, снижение расхода твердого и газообразного топлива, увеличение производительности агломашиин [6].

Рациональная технология обеспечивает выполнение большого перечня задач, в который входят [7]:

- минимизация колебаний химического и гранулометрического состава шихты, содержания топлива в шихте по высоте и ширине слоя;
- рациональное распределение гранулометрического состава шихты и концентрации топлива по высоте слоя;

- обеспечение минимальной дискретности (прерывистости) потока шихты при ее движении по тракту перегрузки - от барабана-окомкователя до паллет агломашин;

- обеспечение рациональной степени сегрегации шихты, при которой достигаются необходимые показатели процесса спекания;

- минимизация степени разрушения гранул и комков шихты при перегрузках ее от барабана - окомкователя до паллет агломашин;

- обеспечение одинаковой высоты слоя шихты по ширине, а следовательно, и по длине всей площади спекания агломашин;

- автоматическое регулирование расхода, режима движения потока шихты из промежуточного бункера до паллет;

- рациональное выравнивание (заглаживание) поверхности слоя шихты перед зажигательным горном;

- обеспечение одновременного по ширине агломашины подхода зоны горения к нижней границе слоя.

На современных аглофабриках на колосниковую решетку паллет вначале загружают так называемую защитную «искусственную постель» - отсеянную из агломерата мелкую фракцию крупностью 12–15 мм и более, которая выполняет ряд важных функций. Слой постели толщиной 30-40 мм (иногда до 100 мм) исключает просыпь шихты через щели между колосниками, прилипание к ним расплавленной массы спека, предохраняет колосники, подколосниковые балки паллет от чрезмерного нагрева, деформации и износа, не допускает забивание щелей колосникового поля агломашин сырой шихтой и расплавом, служит своеобразным фильтром для запыленных отходящих из слоя газов, снижая концентрацию пыли в них в 4-5 раз.

Приведение в исправное состояние колосниковой решетки паллет агломашин является неотъемлемой частью технологии загрузки шихты на агломашин и фигурирует одним из начальных пунктов в соответствующих разделах типовой и заводских технологических инструкций по производству железорудного агломерата.

Выделение из загружаемой на агломашин шихты так называемой «естественной» постели в процессе ее сегрегации шихты на поверхности загрузочного лотка (ЗЛ) и откосе загружаемого слоя, представляет собой отдельную трудоемкую задачу.

Условия для эффективного выделения (сегрегации) крупных фракций из загружаемой шихты в приколосниковую часть загружаемого слоя создают следующим образом:

- а) обеспечивают наличие в готовой окомкованной шихте достаточного количества относительно крупных гранул, получаемых на основе комкующих фракций аглоруды, возврата, других компонентов крупностью более 5-7 мм в ходе процесса окомкования, как правило, известкованной шихты в барабане – окомкователе;

- б) создают предпосылки для лучшей сегрегации шихты путем применения регулирующего шибера, увеличения частоты вращения барабанного питателя,

применения стабилизатора потока шихты, двухступенчатого ЗЛ с покрытием первой ступени износостойким гибким материалом, допускающим применение пневматического обрушения налипаний шихты и обязательного удаления из шихты посторонних крупногабаритных предметов.

Исследования и практика работы агломерационных фабрик показывают, что полученная в обычных условиях, без применения вышеуказанных мероприятий естественная постель не отвечает своему назначению [1].

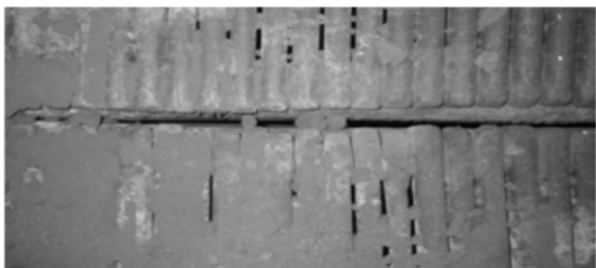


Рисунок 1 - Фрагмент залипшей колосниковой решетки агломашины [1]

Неудовлетворительное качество естественной постели нередко приводит к забиванию колосниковой решетки мелкой шихтой и расплавом (рисунок 1), вынуждает проводить трудоемкие работы по очистке колосников от заливаний. Слой постели принимает на себя, как уже подчеркивалось, большую тепловую нагрузку, защищая от перегрева паллеты агломашины.

Зависимость содержания фракций более 5 мм в пограничном с колосниковой решеткой слое шихты толщиной 40 мм от количества этой фракции в исходной грубозернистой шихте, например, агломашин АКМ-312 НЛМК, где в период исследований [8] она загружалась на паллеты в два слоя, показана на рисунке 2. Как видно из рисунка, даже при максимальном содержании фракции +5 мм в исходной шихте, равном 31%, ее доля в постели составляет 58%, т.е. в постели содержится 42% фракции < 5 мм, снижающей показатели процесса спекания. Кроме того, наличие горючего углерода в пограничном с колосниковой решеткой слое приводит к разгару колосников и припеканию к ним агломерационного расплава (спека). Это обуславливает возрастание циркуляционной нагрузки пыли и запыленности отходящих газов на входе в газоочистные устройства.

Из данных рисунка 3 следует вывод о малой эффективности увеличения высоты слоя постели более 60 мм для снижения выноса пыли.

При исследовании тепловой работы постели измерения температур на паллетах агломашины показали, что отсутствие постели приводит к значительному перегреву колосников (до 690 °С в зоне спекания и 860 °С в зоне охлаждения). При наличии постели толщиной 30 мм температура колосников снижается до 420 °С и 790 °С соответственно, что значительно продлевает срок службы колосников и улучшает стабильность процесса.

Таким образом, современная рациональная технология формирования слоя шихты предусматривает:

- Модернизацию комплексов загрузочного устройства (КЗУ) агломашин для обеспечения равномерной и контролируемой загрузки шихты по ширине.
- Использование стабилизаторов потока шихты для улучшения сегрегации и формирования качественной постели.

- Контроль гранулометрического состава шихты и обеспечение достаточного количества крупных фракций.
- Обязательное удаление посторонних предметов и улучшение условий подачи шихты.

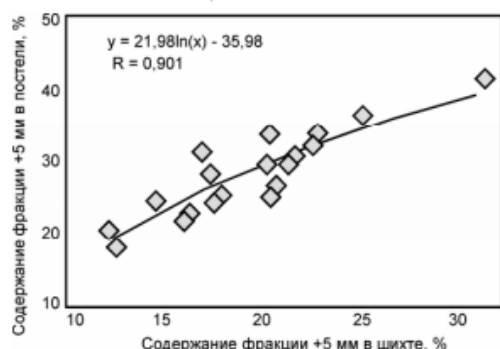


Рисунок 2 - Соотношение между содержанием фракции +5 мм в шихте и в «естественной» постели [1]

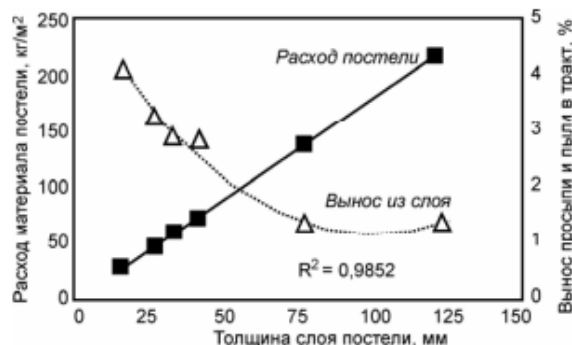


Рисунок 3 - Зависимость потерь шихты и выноса пыли от расхода материала постели и толщины ее слоя [7]

Литература:

1. Фролов, Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. — Москва : Metallurgizdat, 2016. — 672 с.
2. Русаков, П.Г. Исследование закономерностей распределения неоднородного сыпучего материала по откосу / П.Г. Русаков, И.Ф. Русанов, В.Г. Мороз // Известия ВУЗов. Черная металлургия. — 1985. — № 6. — С.15-18.
3. Исследование и совершенствование укладки шихты на агломашину / С. Н. Петрушов [и др.] // Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса. — Киев: Наукова думка, 1983. — С. 29-33.
4. Петрушов, С.Н. Современный агломерационный процесс: монография. — Алчевск: ДонГТУ, 2006. — 357 с.
5. Фролов, Ю.А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации // Сталь. — 2003. — № 12. — С. 2-11.
6. Коротич, В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. — Москва: Металлургия, 1978. — 208 с.
7. Фролов, Ю.А. Состояние перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 3. Загрузка шихты и постели на агломерационную машину // Бюллетень «Черная металлургия». — 2017. — № 6. — С. 22-31.
8. Усовершенствованная система загрузки шихты на агломашину АКМ-312 / Ю.А. Фролов [и др.] // Черная Металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. — 1987. — № 22. — С. 30-33.

ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И СВАРКА



ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В ЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ

Белова Д.А., Матвеев И.А., Десницкая Л.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Работа посвящена изучению того, как параметры технологического процесса затвердевания металла влияют на окончательные свойства готовой отливки. Подробно исследуются различные технологические факторы (например, скорость охлаждения, температурный режим, использование модификаторов и т.д.), и анализируется их воздействие на характеристики полученного металлического изделия. Цель исследования – установить зависимости между параметрами процесса литья и такими свойствами отливки, как механическая прочность, твердость, пластичность, структура и другие, чтобы оптимизировать процесс производства и получить отливки с заданными свойствами. В рамках исследования вероятно проводятся эксперименты, анализ полученных данных и построение математических моделей, описывающих эти взаимосвязи.

Известно, что характер протекания процессов затвердевания стальных отливок во многом определяет их плотность, макро- и микроструктуру и в конечном счете служебные свойства литых деталей. Затвердевание происходит одновременно от границы раздела отливка-форма в направлении осевой части стенки отливки и вдоль стенки отливки, как правило, в сторону прибыли. Скорость продвижения фронта кристаллизации различается как во времени, так и по направлению [1]. Чем выше скорость затвердевания (при условии доступа питающего металла к переднему фронту кристаллизации), тем выше плотность. В связи с этим скорость продвижения фронта кристаллизации целесообразно оценивать степенью направленности затвердевания в поперечном и продольном направлениях виде относительного временного градиента:

$$G = (\tau_2 - \tau_1) / \tau_1 \Delta l, \quad (1)$$

где τ_1 , τ_2 – соответственно время затвердевания питаемого и питающего участков отливки; Δl – расстояние от питающего участка отливки в направлении нормали к линии фронта кристаллизации.

Постепенное снижение величины G по мере затвердевания стенки отливки всегда вызывает снижение плотности и ухудшает качество металла [2]. Если в процессе отливки возникает осевой временной градиент G , направленный в сторону прибыли, то его итоговое значение в поперечном сечении отливки можно наглядно представить в виде кривой с минимальным значением на термической оси (рисунок 1).

Можно предположить, что распределение плотности и механических свойств будет иметь аналогичный характер. Следовательно, (особенно для толстостенных отливок), прочностные или другие служебные свойства являются интегральными для всего сечения отливки, обусловлены характером

распределения G и должны соответствовать величине площади S_G под кривой (рисунок 1). По параметру S_G можно оценить технологическую герметичность сечения отливки. В то же время, исходя из расчета на прочность, стенка отливки, выступающая элементом конструкции, функционирует как единое целое под воздействием нагрузки, несмотря на различные характеристики в расчетном сечении [3,4].

При этом коэффициенты запаса прочности и допускаемые напряжения назначаются по свойствам (σ_T , σ_B), полученным на образцах, вырезанных из литых проб. Такой подход не всегда корректен, подтверждением чего является излишняя металлоемкость ряда отливок.

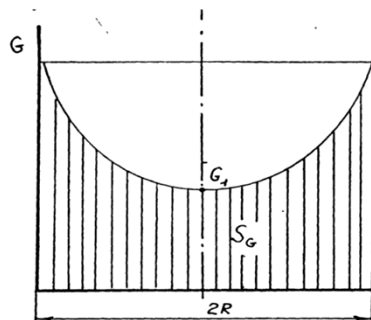


Рисунок 1 - Схема распределения временного градиента по сечению стенки отливки

Установив взаимосвязь требуемых служебных свойств с технологическим интегральным показателем S_G , можно проектировать технологию изготовления отливок на заданные служебные свойства, варьируя средствами управления затвердеванием.

Установления взаимосвязь механических свойств стали 25Л с технологическими параметрами, полученная с помощью термического анализа кристаллизации плиты с размерами $600 \times 600 \times t_i$ мм, (где t_i равна 60, 80 и 100 мм). Обработка термических кривых позволяет получить распределение продолжительности затвердевания и изменение осевого временного градиента по высоте.

Образцы для механических испытаний вырезали в поперечном направлении там, чтобы термическая ось стенки отливки располагалась нормально рабочей части образца, т.е. механические свойства при растяжении (σ_T , σ_B , δ , ψ) и относительный временной градиент устанавливались для осевой части плиты.

Результаты механических испытаний показали значительный разброс свойств, причем значения прочности (σ_T , σ_B) оказались слабо зависящими от G и пористости. В значительной степени от G зависит пластичность (δ , ψ) стали. После линеаризации и усреднения получена приближенная зависимость $\delta = f(G)$ (рисунок 2).

Одновременно с этим отмечается влияние на величину δ продолжительности затвердевания, которое обусловлено главным образом формированием различной микроструктуры стали 25Л. Эту взаимосвязь приближенно можно представить, как степень отклонения от максимального δ_0 :

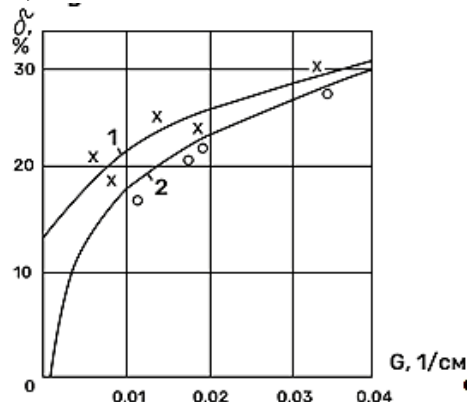
$$\delta/\delta_0 = 2,62 (G - 0,0005\tau_3^{0,3} + 0,0006)^{0,3}, \quad (2)$$

где δ – значение относительного удлинения в рассматриваемом локальном объеме, %;

τ_3 – продолжительность затвердевания, мин.



а



б

Рисунок 2 - Изменение продолжительности затвердевания (а) и пластичности (б) по длине торцевой зоны отливки толщиной 6 (кривая 1) и 10 (кривая 2) см.

Обработка данных по исследованию объемной пористости в отливке позволила получить выражение следующего вида:

$$G = 2,29 \cdot 10^{-3} \Pi^{-1,25} R^{-1}, \quad (3)$$

где Π – пористость, %; R – приведенная толщина стенки отливки, см.

Расчет технологии изготовления отливки сводится в конечном итоге к обеспечению требуемых технологических параметров затвердевания в каждом ее локальном объеме.

Литература

1. Рабинович А.В., Бубликов Ю.А., Трегубенко Г.Н. и др. Улучшение структуры и повышение свойств литых феррито-перлитных сталей для транспортного машиностроения // Современная электрометаллургия. – 2008. – №1. – С. 36–40
2. Mirzadeh H., Alibeyki M., Najafi M. Unraveling the initial microstructure effects on mechanical properties and work-hardening capacity of dual-phase steel // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2017. – Т. 48. – №. 10. – С. 4565-4573.
3. Десницкий В.В., Десницкая Л.В., Матвеев И.А. Обеспечение плотного металла в тонкостенной отливке при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. - 2021. - №2. - С. 23-27.
4. Desnitskiy V.V., Desnitskaya L.V., Matveev I.A., Kovalev P.V. Study of conditions for ensuring the density and reliability of cast fittings. // Черные металлы. 2020. - -Т. 2020. - №7. - С. 35-39.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Бородацкий И.А., Дятлов Д.В., Пасечник С.Ю.
Донецкий национальный технический университет

Литье по газифицируемым моделям - это способ производства отливок, который дает возможность изготовления сложных по конфигурации моделей без использования стержневого и смесеприготовительного оборудования.[1]

Суть его состоит в том, что литье осуществляется по пенополистирольным моделям, которые не удаляются из формы, а остаются в ней и газифицируются под действием тепловой энергии металла, заливаемого в форму. По сравнению с традиционными, этот метод наиболее экономичный и прогрессивный. Для изготовления моделей применяется полистирол мелких фракций от 0,3 до 0,9 мм (в зависимости от габаритов детали). Полистирол предварительно подвспенивается под воздействием пара и просушивается. Детали изготавливаются в пресс-формах (материал D16T). В пресс-формы задувается подвспененный полистирол, который затем спекают, нагревая под давлением. Формы охлаждаются, и извлекают готовые модели. Модели собираются в кусты (кластеры) склеиванием, либо сваркой. Окраска моделей производится в один слой специальными красками окунанием в ванну, либо обливанием, при сложной конфигурации деталей. Сушка окрашенных кустов производится в камере при температуре 40 – 600С в течение двух – трех часов. Формовка модельных кустов производится в опоку, установленную на вибростол, обладающий тремя степенями свободы, постепенной засыпкой песком во время вибрации, либо послойно. Заформованные опоки подаются на заливочный участок. Опоку накрывают полиэтиленовой пленкой и подключают к вакуумной системе. Формовочный песок с помощью вакуума приобретает заданную прочность. Все передвижения на линии происходят по приводным рольгангам.

Заливка металла производится прямо в полистирольные стояки, которыми на этапе склейки образованы кусты моделей. Горячий металл выжигает (газифицирует) полистирол и занимает его место. Выделяющиеся газы отсасываются через слой краски в песок и затем – в вакуумную систему. Металл точно повторяет форму полистирольной модели. Отливки остывают в песке, от нескольких минут до нескольких часов, в зависимости от толщины, массы детали и технических условий, определяемых технологическим процессом.

Литниковая система представляет собой совокупность конструктивных элементов, таких как стояк, коллектор, питатели, выпоры, прибыли, предназначенных для формирования отливок и обеспечения их физико-механических свойств. Параметры литниковой системы, включая размеры, конфигурацию литников и температурные режимы, существенно влияют на

возникновение дефектов, таких как пористость, трещины и недоливы. Эти дефекты могут возникать в результате неправильного проектирования литниковой системы или неконтролируемых условий литья, что требует многократных итераций и затрат на повторные плавки для достижения оптимального качества отливок. В случае выявления дефектов в экспериментальных отливках, требуется внесение корректировок в параметры литниковой системы и повторное литье. Этот процесс может потребовать от трех до пяти плавков, что влечет за собой дополнительные затраты на материалы и время для достижения отливки наилучшего качества.

Упростить задачу такого проектирования позволяет программа LVMFlow[2]. Программа LVMFlow является высокоэффективным инструментом для моделирования процессов заливки и кристаллизации, позволяющим визуализировать поток расплавленного металла и предсказывать потенциальные дефекты. Она предоставляет возможность детального анализа термодинамики процессов и оптимизации проектирования оснастки. Применение LVMFlow позволяет заранее идентифицировать дефекты, что способствует повышению качества продукции и экономии ресурсов, а также открывает новые горизонты для повышения эффективности и надежности литейного производства.

В качестве основного изделия была выбрана коронка зуба ковша экскаватора типа Caterpillar.[3]

Вначале проектирования строится 3D-модель коронки с применением 3D-сканера.[4]

При построении модели необходимо учитывать усадку металла, а также последующую механическую обработку. Построение модели ведется в программе "КОМПАС-3D" (рисунок 1).

Для дальнейшего моделирования процессов отливки, помимо модели изделия, в состав литейной оснастки входит литниковая система, состоящая из стояка, коллектора и питателя. Первый тестовый вариант литниковой системы со стояком размерами основания 25x25 и двумя питателями диаметром 12,5x12,5 (рисунок 2).

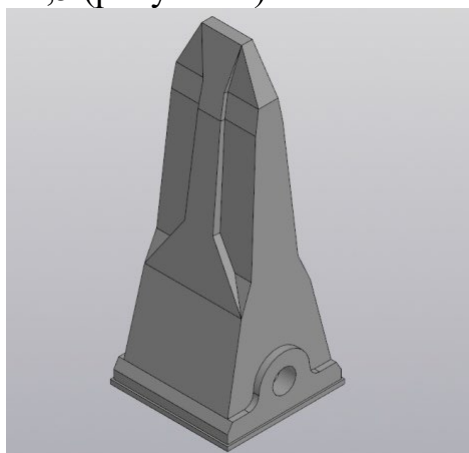


Рисунок 1 - 3D модель коронки ковша

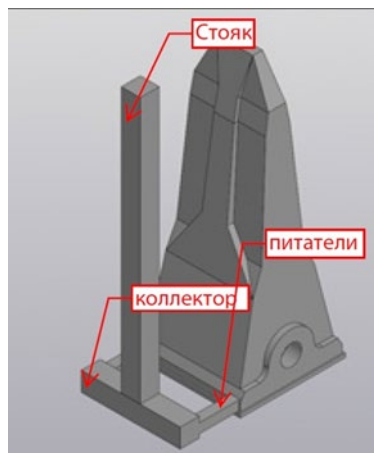


Рисунок 2 - Первый вариант 3D модели с литниковой системой

После построения модели детали с литниковой системой в программе LVMFlow задаются начальные установки для проектирования процесса затвердевания выбранной отливки: задаются материалы литейной конфигурации, начальные значения теплофизических параметров, технологическая оснастка, формируется разностная сетка, создается или редактируется существующий паспорт для сохранения результатов моделирования.

В качестве материалов для создания формы был выбран кварцевый формовочный песок с массовой долей глинистой составляющей от 0,2% до 0,5%, массовой долей диоксида кремния не менее 99,0%, коэффициентом однородности от 60,0% до 70,0% и средним размером зерна от 0,19 до 0,23 мм.

Материал отливки EN-GJS-400-15 — это разновидность серого чугуна с шаровидным графитом. Его химический состав: С — 2,5–3,8%, Si — 0,5–2,5%, Mn — 0,2–0,5%, P — $\leq 0,08\%$, S — $\leq 0,02\%$. Температура заливки - 1260°C, порог текучести - 70%, порог протекания - 30%, порог Нийама - 3%. Диаметр подачи струи расплава составляет 15мм.

Результаты моделирования процесса затвердевания детали указаны на рисунке 3.

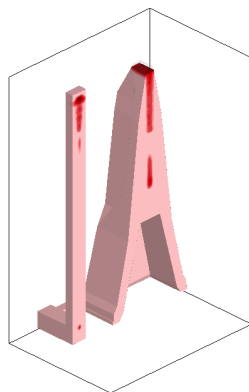


Рисунок 3 - Результаты моделирования процесса затвердевания первой модели

Красным выделены возможные зоны пористости.

Данный опыт показывает, что при застывании, во внутренней полости детали образуются усадочная раковина и зоны пористости, что негативно влияет на качество коронки, делая её склонной к разрушению при работе в карьере.

Для устранения предполагаемых дефектов при кристаллизации отливки необходимы дополнительные эксперименты с изменёнными параметрами начальных установок и переработкой литниковой системы в целом.

В ходе работы была построена новая модель литниковой системы. Размеры стояка были увеличены до диаметра 50x50. Количество питателей увеличено вдвое с неизменными габаритами. Также дополнительно установлен выпор в наивысшей точке детали (рисунок 4).

Начальные установки также подверглись изменениям. Начальная температура расплава увеличена до 1380°C, диаметр струи расплава - 48мм.

Результаты моделирования процесса затвердевания детали указаны на рисунке 5.

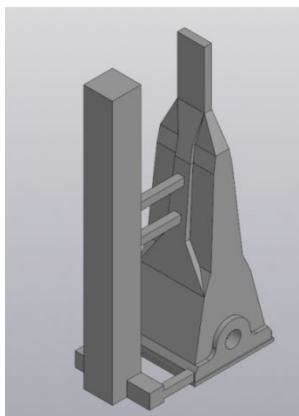


Рисунок 4 - Второй вариант 3D модель с литниковой системой

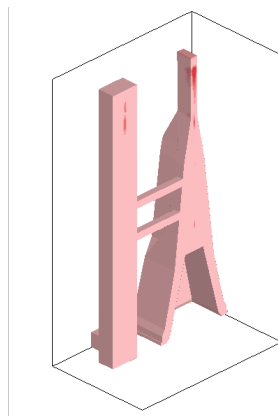


Рисунок 5 - Результаты моделирования процесса затвердевания второй модели

По результатам расчетов в программе LVMFlow и визуализации полученных дефектов видно, что наиболее качественная отливка получается при расположении литниковой системы по варианту 2. Однако, усадочные места все еще присутствует, и для полного из удаления требуются дополнительные эксперименты с последующей доработкой литниковой системы.

Полученные экспериментальные данные показывают, что программа LVMflow позволяет довольно точно прогнозировать потенциальные дефекты изделий, как внешних, так и внутренних. Это позволяет более точно подбирать параметры оснастки и заливки, что способствует предотвращению возникновения дефектов. В результате повышается качество продукции, а также достигается экономия материалов и времени, необходимых для повторной плавки и создания новых форм.

Литература

1. Шуляк, В.С. Литье по газифицируемым моделям – СПб.: НПО «Профессионал», 2007.– 408 с.
2. Огородникова, О.М. Компьютерное моделирование литейной технологии в программной среде LVMflow [Электронный ресурс] / Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2018. – 38 с. Режим доступа: <https://cae.urfu.ru> свободный.
3. <https://deltaparts.ru/articles/sovety-pokupatelyam/koronki-dlya-kovsha-kak-pravilno-vybrat/>
4. Лысыч М. Н., Шабанов М. Л., Жадобкина В. В. Современные системы 3D сканирования // Молодой ученый. - 2014. - №20. - С. 167-171.

ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ БРОНЗ ТИПА БрАЖ

Бородацкий И.А., Дятлов Д.В., Пасечник А.Ю.
Донецкий национальный технический университет

Алюминиевые бронзы занимают важное место в промышленности благодаря сочетанию высокой прочности, отличным антифрикционным свойствам, хорошей коррозионной стойкости, устойчивости к кавитации и коррозионной усталости, хорошей обрабатываемости резанием и фрезерованием, данный тип бронз нашел применение в машиностроении и авиапромышленности, судостроении, компрессорное и насосное оборудование, транспорте и энергетике, пищевой промышленности [1].

В статье рассмотрены технологические особенности выплавки сплава БрА9Ж4 — безоловянной алюминиево-железистой бронзы. Ниже в таблице 1 приведен химический состав сплава, а в таблице 2 механические свойства [2].

Таблица 1 – Химический состав

Элемент	Cu	Al	Fe	Mg, Zn, Si, Pb, P и др
Содержание, %	83,3–90	8–10	2–4	До 2,7

Таблица 2 – Механические свойства при T=20°C

Показатель	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж / м ²
	390	196	10	30	588

Производство алюминиевых бронз сопряжено с рядом технологических трудностей [3], связанных с высокой окисляемостью алюминия, трудностью растворения железа в меди и способностью к накоплению растворенных газов при использовании в шихте большого количества отходов. Все эти трудности определяют необходимость точного соблюдения параметров плавки, рафинирования и легирования.

Плавку осуществляют в индукционных тигельных или канальных печах с футеровкой из шамота, кварцита или глинозёма. Для минимизации взаимодействия расплава с футеровкой предпочтительны графито-шамотные тигли. Шихта состоит из следующих компонентов:

- Медь марок М00–М2;
- Алюминий марок А5–А7;
- Легирующие добавки: Fe (обрезки мягкой стали), Mn (марки Мр1–Мр3), Ni (марки Н-2–Н-4);
- Лигатуры: Cu-Fe (20–30% Fe), Cu-Mn (25–35% Mn), Al-Fe (5–25% Fe).

Доля возвратов в шихте не должна превышать 75% во избежание накопления оксидов и газов.

Последовательность введения компонентов:

1. Расплавление меди с последующим раскислением фосфором.
2. Введение 1/3 алюминия для экзотермического разогрева ванны.

3. Добавление Fe и Mn в расплав Cu-Al.

4. Введение оставшегося алюминия с погружением на глубину для минимизации окисления.

Приведенная очередность введения различных компонентов алюминиевых бронз диктуется способностью некоторых из них образовывать интерметаллиды с повышенной температурой плавления, плохо растворяющиеся в расплаве. Жидкий металл при этом получается неоднородным по химическому составу, что может сказаться на его свойствах. Опасность образования интерметаллидов в системе Cu-Al-Mn-Ni-Fe возрастает, если алюминий весь вводят в конце плавки. Поэтому предпочтительнее вводить алюминий в расплав в несколько приемов.

Отличительной особенностью технологии выплавки алюминиевых бронз является необходимость хорошего раскисления металла перед подачей алюминия, иначе во всем объеме ванны печи возможно образование дисперсных включений Al_2O_3 , резко повышающих вязкость расплава и затрудняющих дальнейшее ведение плавки. При этом даже при введении алюминия в нераскисленный металл не наблюдается газовой пористости отливок, однако значительно повышается количество неметаллических включений, что приводит к понижению прочности, снижают пластичности и ударной вязкости материала, коррозионной стойкости.

Очередность введения в жидкий металл тугоплавких компонентов определяется интенсивностью их растворения. Так, железо плохо растворяется в чистой меди, а марганец хорошо. Поэтому вначале в медь вводят марганец, а затем железо, которое в расплаве Cu-Mn растворяется лучше. Также быстрее и лучше железо растворяется в расплаве Cu-Al. Поэтому после расплавления меди и ее раскисления фосфором иногда дают в ванну печи часть алюминия (примерно 1/3- 1/5 от расчетного количества). При этом ванна разогревается благодаря экзотермическому характеру растворения алюминия в меди, и в расплав вводят железо и марганец, а затем уже остальное количество алюминия. В этом случае обоснована практика введения в печь меди в несколько приемов, в частности, примерно 1/4-1/5 части меди вводят в расплав после загрузки алюминия, когда ванна печи самопроизвольно разогревается, и медь хорошо растворяется в металле. При введении алюминия в жидкий металл подогретые куски алюминия стараются быстро погружать в глубину расплава. Если же загружать алюминий на поверхность, произойдет нежелательное повышенное окисление расплава.

В настоящее время при выплавке алюминиевых бронз применяют следующие методы рафинирования [4]:

1. При плавке в канальных и тигельных индукционных печах применяют покровы из древесного угля вместе с легкоплавкими солями (криолит, бура и др.): древесный уголь + криолит/бура (соотношение 2–3:1); солевые смеси (40% Na_3AlF_6 + 40% CaF_2 + 20% $NaCl$).

Комбинированный покров удобен в работе, так как древесный уголь не только защищает зеркало металла от окисления, но и утепляет поверхность, что

уменьшает интенсивность образования прочной твердой окисной пленки, а жидкая составляющая создает более плотный защитный покров и за счет хорошего смачивания оксидных плен, образующихся в процессе расплавления шихты, очищает от них расплав, что особенно важно для удаления окиси алюминия. Отрицательным моментом, при использовании жидких флюсов, является их высокая агрессивность к материалу футеровки печи.

Иногда применяют рафинирование жидкими флюсами в ковше, что позволяет увеличить поверхность контакта флюса и металла за счет интенсивного перемешивания при заливке в ковш жидкой бронзы из плавильной печи. Флюс приготавливают в отдельном агрегате и заливают в ковш до бронзы. Количество флюса 3-5% от массы бронзы.

2. Внепечное рафинирование расплавов бронз летучими хлористыми солями ($MnCl_2$, $CuCl_2$ и др.). При этом небольшую навеску соли (0,1...0,3 % от массы шихты) вводят графитовым колышком в расплав. Образующиеся при возгонке пузырьки летучих хлоридов $AlCl_3$ флотируют оксидные и другие включения и выносят их на поверхность в шлак. Обработка длится 10...60с, в зависимости от массы металла с последующей выдержкой расплава в течение 3...10 мин для удаления продуктов обработки.

3. Продувка азотом/аргоном (0,05 л/(мин·кг), 5–7 мин). При продувке температура расплава алюминиевых бронз снижается примерно на 40...50 °С, поэтому необходимо перед продувкой перегреть расплав до 1220 °С;

При продувке алюминиевых бронз недопустим интенсивный барботаж расплава, что может привести к дополнительному окислению металла. Поэтому наиболее удобно вдувать газ в расплав через пористые керамические насадки, обеспечивающие многопузырьковое поступление газа в металл.

Выводы: алюминиевые бронзы, обладая высоким механическими и эксплуатационными свойствами, являются хорошими заменителями оловянистых бронз, при этом имеют более низкую стоимость. Однако специфика поведения компонентов сплава, требует жесткой технологической дисциплины, несоблюдение которой приводит к высокому браку отливок по неметаллическим включениям, водородной пористости. Применение современных методов дегазации, таких как продувка инертными газами, хлористыми соединениями, позволяет получать качественные отливки, уменьшить количество брака.

Литература

1. Куприянов, В. В. Алюминиевые бронзы: свойства, технология, применение / В. В. Куприянов, А. С. Кузнецов. - М.: Машиностроение, 2007. - 256 с.
2. Кузнецов, А. С. Производство и обработка алюминиевых бронз / А. С. Кузнецов. - СПб.: Профессия, 2010. - 312 с.
3. Горбунов, Л. А. Технология выплавки и литья бронз / Л. А. Горбунов. - Екатеринбург: УрФУ, 2015. - 198 с.
4. Миронов, В. И. Методы рафинирования цветных металлов / В. И. Миронов. - М.: Наука, 2011. - 220 с.

ОТЛИВКА КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК В КОКИЛЬ

Дятлов Д.В., Бородацкий И.А., Пасечник А.Ю.
Донецкий национальный технический университет

Кольцевые отливки, благодаря своей геометрии (замкнутая форма, тонкие стенки, большой диаметр по сравнению с толщиной), имеют ряд ограничений при использовании технологии литья в кокиль [1]. Несмотря на высокую точность и чистоту поверхности, присущие этому методу, при производстве кольцевых отливок возникают специфические трудности, связанные с усадочными напряжениями и дефектами, обусловленными неправильно рассчитанной прибылью и месту её расположения.

Технологии литья кольцевых отливок в кокиль [2], присущи некоторые особенности:

- неподатливость кокиля – в отличие от песчаных форм, кокиль практически не деформируется при усадке металла, что затрудняет свободное сокращение отливки при затвердевании. Это особенно актуально для кольцевых изделий, где усадка происходит по всему периметру, а форма препятствует ее равномерному протеканию.

- риск внутренних дефектов – кокиль обеспечивает высокую точность размеров и чистоту поверхности, однако неподатливость формы способствует возникновению внутренних напряжений и трещин.

Усадочные напряжения возникают из-за того, что металл при затвердевании уменьшается в объеме, а жесткая металлическая форма препятствует этому процессу. В кольцевых отливках это приводит к следующим проблемам:

- горячие трещины – наиболее характерный дефект для кольцевых отливок в кокиле - возникающие при кристаллизации металла в области твердо-жидкого состояния материала отливки. Они образуются из-за того, что усадка ограничена металлическим стержнем, а возникающие растягивающие напряжения превышают предел прочности сплава при высокой температуре. Особенно часто такие трещины образуются в кольцевых отливках с малой толщиной стенки и большим диаметром, где отношение толщины к диаметру минимально.

- коробление – неравномерное охлаждение и различия в скорости усадки по сечению кольца могут привести к короблению изделия (в случае, когда образующиеся напряжения по величине превышают предел текучести материала) - изменению его геометрии, что критично для точных деталей.

- внутренняя пористость - если усадка не компенсирована, в центральных зонах кольца могут образовываться усадочные раковины и поры.

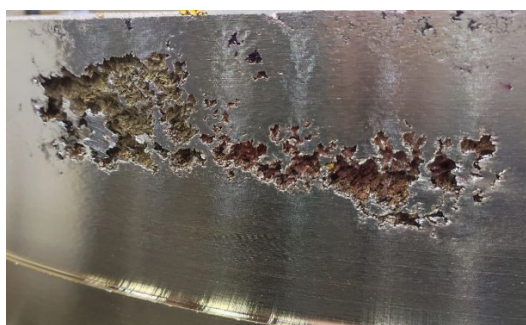
Неправильно выбранное место расположения, величина и количество прибылей (дополнительный объем металла, который затвердевает последним и обеспечивает подпитку усаживающихся участков отливки жидким металлом) приводят к следующим дефектам:

- усадочные раковины – если прибыль мала, жидкий металл не успевает заполнить образующиеся в процессе кристаллизации полости, и в теле отливки остаются раковины и пустоты.

- несплошности – недостаточная подпитка может привести к образованию внутренних разрывов, сегрегаций и даже сквозных трещин, особенно в зонах максимального теплового узла (например, в местах сопряжения стенок или в переходах сечения).

- ликвация – при быстром затвердевании без достаточной прибыли могут возникать зоны с неоднородным химическим составом (ликвация), что снижает механические свойства изделия.

На рисунке ниже представлены дефекты кольцевой отливки, выполненной из сплава БрА9Ж2.



а



б

Рисунок 1 – Дефекты отливки: а - усадочная рыхлость, б - горячая трещина

Для предотвращения данных дефектов применяют следующие подходы [3,4]:

- оптимизация размеров прибыли - размер прибыли должен быть достаточным, чтобы обеспечить подпитку наиболее массивных и поздно затвердевающих участков кольца.

- использование податливых стержней - для уменьшения механического торможения усадки применяют песчаные или керамические стержни, которые легче деформируются, снижая уровень внутренних напряжений.

- контроль температуры кокиля – предварительный нагрев кокиля и регулировка скорости охлаждения позволяют снизить разницу температур по сечению отливки, уменьшить термические напряжения и риск образования горячих трещин.

- рациональная конструкция литниковой системы - правильное размещение литников и прибылей способствует равномерному заполнению формы и эффективной подпитке усаживающихся зон.

- скругление переходов - увеличение радиусов закругления в местах сопряжения стенок снижает концентрацию напряжений и вероятность образования трещин.

В случае, когда материал отливки имеет высокую стоимость, или количество материала ограничено (особенно в условиях ремонтного производства), в ДонНТУ разработан способ литья колец большого диаметра,

сущность которого заключается в получении либо 2 полуколец, либо С-образной (незамкнутое кольцо) отливки, это позволяет практически избавиться от внутренних усадочных напряжений. Далее половинки колец или зазор в С-образной заготовке заваривается электрошлаковым способом.



а



б

Рисунок 2 - Способ кокильного литья: а – кокиль с перегородкой для формирования С-образной заготовки, б – готовое кольцо после электрошлаковой сварки

Получение кольцевых отливок в кокиль - технологически сложная задача из-за высокой склонности к образованию усадочных напряжений, горячих трещин и дефектов, связанных с недостаточной прибылью. Для минимизации этих проблем требуется тщательный расчет размеров прибыли, оптимизация конструкции формы и литниковой системы, а также контроль температурных режимов на всех этапах литья. Предложенный способ позволяет избавиться от усадочных напряжений, экономить материал отливки за счет уменьшения массы прибыльной части.

Литература:

1. Гусев В.Г., Кузнецов В. И. Литье в кокиль: учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 2004. - 352 с.
2. Клявин, Я.М. Литье кольцевых заготовок. - М.: Metallurgy, 1978. - 208 с.
3. Кравченко, В. И. Дефекты отливок и способы их устранения. - М.: Машиностроение, 1981. - 256 с.
4. Кузнецов В.И., Гусев В. Г. Технология литейного производства: учебное пособие. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2002. - 400 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НА КАЧЕСТВО НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Максимов Р.А., Матвеев И.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Чтобы провести качественный анализ влияния технологии на точность попадания в заданный химический состав были собраны и рассмотрены данные по пятидесяти плавкам, проведённым до 2011 года по технологии ДСП-50+УВРВ-1 и пятидесяти плавкам 2022 года по технологии ДСП-120+УВРВ-3 нержавеющей стали аустенитного класса марки 08X18H10T(У, Е). Данные марки стали обладают следующим составом: до 0.08 С; до 0.8 Si; до 2 Mn; 9-11 Ni; до 0.02 S; до 0.035 P; 17-19 Cr; до 0.3 Cr; ~65 Fe. Целью анализа было проследить влияние варианта технологии производства нержавеющей сталей, а также варианта технологии разлива на качество получаемых слитков. В результате сбора данных из операционных карт плавки было проведено сравнение точности попадания в заданный химический состав, что позволило вывести ряд зависимостей, которые сейчас будут подробно изучены.

Анализ попадания в заданное содержание Cr

Для проведения анализа собранные данные были обработаны и заключены в графики. Чтобы определить, как переход на современный техпроцесс повлиял на точность получения заданного химического состава, будут рассмотрены графики следующих формаций – две гистограммы, которые отображают частоты попадания в определённые интервалы за два периода производства (рисунки 1 и 2), а также график, на котором сравнивается распределение плотностей вероятности получения плавки с данным содержанием компонента между двумя периодами производства (рисунок 3).

Хром является одним из наиболее важных легирующих элементов. Основным его назначением является придание стали коррозионностойкости. Вместе с этим, он улучшает термостойкость, износостойкость и делает сталь более прочной.



Рисунок 1 - Частота попадания [Cr] в интервал (2011 г)



Рисунок 2 - Частота попадания [Cr] в интервал (2022 г.)

Сравнивая эти графики, можем заметить, что на гистограмме 2022 года более ярко выражен пик в среднем сегменте выборки.

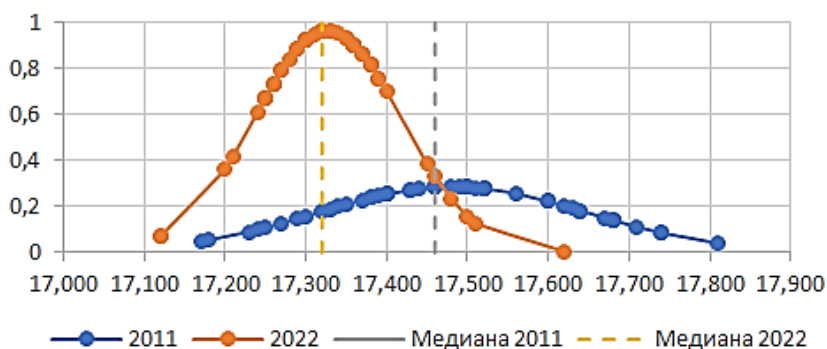


Рисунок 3 - График распределения плотностей вероятности попадания концентрации хрома в заданный диапазон

Рассмотренный график подтверждает данные гистограмм – плавки 2011 года распределены более равномерно по всему интервалу, в отличие от 2022 года, где основной процент плавов собрался около медианы образуя пик.

В результате анализа графика на рис. 3 получены следующие выводы: при переходе на новую технологию удалось значительно повысить точность получаемого химического состава стали, вместе с этим задав тенденцию к снижению содержания компонента, о чём сигнализирует сместившаяся влево медиана на графике 2022 года. Это позволяет утверждать, что для хрома переход на ДСП-120+УВРВ дал повышенную стабильность плавов, что позволило извлекать дополнительную выгоду.

Анализ попадания в заданное содержание S

Сера является чрезвычайно важным компонентом стали, содержание которого в расплаве должно строго отслеживаться, так как она является вредной примесью. Таковой её считают из-за склонности данного элемента к образованию сульфидов, так как он нерастворим в металле, и негативно сказывается на концентрациях других компонентов.

Главной проблемой является образование сульфида железа, который входит в состав эвтектики Fe+FeS, образующейся при 988 °С. Обычно сернистая эвтектика, присутствующая в небольшом количестве коалесцирует, т.е. феррит эвтектики объединяется с ферритом основной масс металла, а FeS располагается по границам зёрен в виде цепочки отдельных включений, или более крупными включениями в виде оторочки по границам зёрен. Такая форма включений является особенно вредной, так как при горячей обработке давлением получают надрывы и трещины, это явление получило название «красноломкость». Также, наличие сульфидов негативно сказывается на технологической пластичности, так как FeS в процессе кристаллизации располагается по границам зерен и при наличии напряжений способствует межзёренному разрушению, а также снижению ударной вязкости и предела текучести.

По этим причинам, критически важно максимально снизить концентрацию серы в стали и получать как можно более стабильные её значения.

На рисунке 4 видим, что наибольшими вероятностями обладают концентрации серы 0.003 и 0.005, на уровне 24 и 36 процентов соответственно. Это даёт небольшой разброс по содержанию элемента в большей части плавов, высокой постоянности в получении данного компонента на технологии ДСП-50+УВРВ добиться не удалось.



Рисунок 4 – Частота попадания [S] в интервал (2011 г.)



Рисунок 5 - Частота попадания [S] в интервал (2022 г.)

Качественно обратная зависимость получилась в 2022 году. Основная масса плавок (более 80%) содержит в себе 0.002 серы, что удовлетворяет любым требованиям по стабильности содержания компонента и величине его содержания (рис. 6).

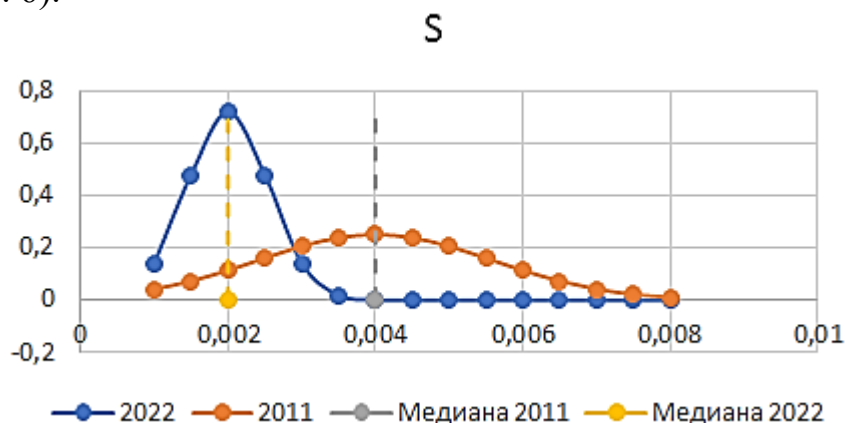


Рисунок 6 – График распределения плотностей вероятности попадания концентрации серы в заданный диапазон

На графике распределения вероятностей попадания концентрации серы в заданный диапазон видим очень четкую картину – по технологии ДСП-120+УВРВ получилось достичь стабильно низкого содержания компонента, в основном, на уровне 0.002 процента, вместо 0.004 на ДСП-50+УВРВ. Это изменение в лучшую сторону, и можно уверенно утверждать, что современная технология позволяет десульфурировать сплав с большей эффективностью.

Литература

1. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. = Alloyed stainless steels and alloys are corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant. Stamps: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2014 г. № 1431-ст : введен впервые: дата введений 2015-01-01/ разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 375 «Металлопродукция из черных металлов и сплавов» на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный Научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»). – Москва: Стандартинформ, 2015. – 48 с.; 29 см. - 44 экз.

2. Кудрин, В. А. Технологические процессы производства стали: учебник / В. А. Кудрин, В. А. Шишимиров. - Ростов н/Д : Феникс, 2017. - 303 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФИЛАМЕНТА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И УГЛЕРОДНЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Симонов А.Ю., Пасечник С.Ю., Ошовский В.В.
Донецкий национальный технический университет

Настоящее исследование посвящено сравнительному анализу различных технологий получения филамента, содержащего в своем составе металлические и углеродные порошки, с целью оценки их эффективности в перспективности для дальнейшего применения.

В последние годы наблюдается стремительное развитие области производства композитных материалов для 3D-печати, что обусловлено потребностью в изделиях с улучшенными механическими и функциональными свойствами. Одним из направлений такого развития стало создание филаментов с добавлением металлических и углеродных порошков. Применение этих наполнителей позволяет значительно расширить функциональные возможности печатных изделий, включая повышение их прочности, теплопроводности, электропроводности и износостойкости. Однако выбор технологии получения композитного филамента является важным фактором, влияющим как на свойства конечного продукта, так и на экономическую эффективность его производства. В данной статье рассмотрены основные подходы к изготовлению филаментов с наполнением порошками и проведён их сравнительный анализ.

Для получения качественного композитного филамента порошковые наполнители должны обладать рядом характеристик. Размер частиц должен находиться в диапазоне 1–50 мкм для обеспечения хорошей текучести и равномерного распределения. Предпочтительна сферическая или околосферическая форма частиц, способствующая лучшей переработке.

Выполнение этих требований характерно для таких способов получения порошков, как: распыление в инертной среде, плазменное распыление, газоатомизация, а также механическое измельчение с последующей классификацией.

Каждый из этих методов обеспечивает получение порошков с контролируемыми размерами и формой частиц, что особенно важно для обеспечения однородности распределения наполнителя в полимерной матрице и стабильности процесса экструзии филамента[1].

Степень агрегации должна быть минимальной, чтобы избежать дефектов структуры. Распределение по размерам частиц должно быть узким, что повышает стабильность свойств материала. Для улучшения адгезии наполнителя к полимерной матрице рекомендуется поверхностная модификация частиц, которая осуществляется за счет нанесения функциональных химических групп, обработки поверхностей связующими агентами (например, силанами или титанатами), а также плазменной или термической обработки.

Такие методы позволяют улучшить совместимость между наполнителем и полимерной матрицей, что способствует равномерному распределению частиц в филаменте и повышает механические характеристики конечного изделия.

Наиболее широко распространённой технологией получения композитного филамента является прямая экструзия. Данный метод предусматривает смешивание порошка и полимера в расплавленном состоянии внутри экструдера. В процессе экструзии происходит равномерное распределение частиц наполнителя в полимерной матрице с последующей формовкой филамента. На рисунке 1 показана схема метода прямой экструзии.

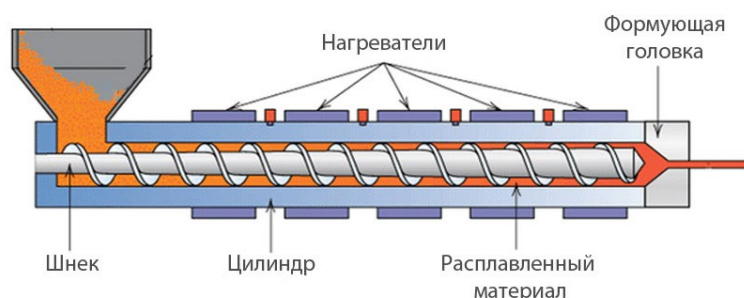


Рисунок 1 – Метод прямой экструзии

Прямая экструзия отличается относительной простотой реализации, невысокой себестоимостью и гибкостью в подборе составов наполнителей. К недостаткам метода относят ограничение содержания порошка, как правило, до 50 %, а также необходимость использования износостойких шнеков и цилиндров экструдера при переработке абразивных наполнителей [2].

Другим распространённым подходом является компаундирование с последующим гранулированием. На первой стадии процесса получают полимерные гранулы с равномерно распределённым порошковым наполнителем, после чего из них методом стандартной экструзии формируют филамент. На рисунке 2 приведена схема метода компаундирования.

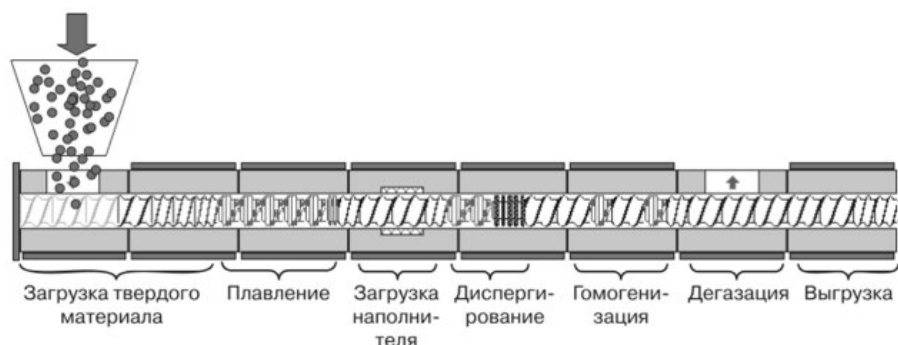


Рисунок 2 – Метод компаундирования

Компаундирование позволяет добиться высокой однородности распределения частиц и стабильности свойств материала от партии к партии. Однако использование дополнительной стадии приводит к увеличению себестоимости производства и возможному ухудшению свойств полимера вследствие многократной термической обработки [3].

В лабораторной практике и при производстве специализированных филаментов применяется технология растворного смешивания. В этом случае полимер растворяется в органическом растворителе, после чего в раствор вводится порошковый наполнитель. После тщательного перемешивания растворитель испаряется, оставляя однородную массу, пригодную для последующей экструзии в филамент. Данный метод обеспечивает исключительно равномерное распределение наполнителя, но сопровождается использованием токсичных веществ и требует тщательной очистки продукции, что ограничивает его применение в промышленности.

Особое место среди технологий получения композитных материалов занимает метод спекания после печати. На стадии производства филамента используется связующая полимерная матрица, содержащая до 90% металлического порошка. После аддитивного формирования объекта изделие подвергается процессу дебайдинга, при котором органическая часть удаляется, а затем спекается до получения плотной металлической структуры. Метод позволяет получать изделия с высокими механическими характеристиками, сопоставимыми с традиционно отливаемыми деталями. Существенными недостатками являются значительная усадка изделия при спекании, сложность процесса и необходимость использования дорогостоящего печного оборудования [4].

Прямая экструзия и компаундирование с гранулированием являются наиболее оптимальными для массового производства полимерных композитных филаментов. Прямая экструзия отличается низкими требованиями к оборудованию и минимальной стоимостью производства, однако в меньшей степени обеспечивает однородность наполнителя. Компаундирование, напротив, позволяет получать материалы с высокой стабильностью свойств, что делает его предпочтительным вариантом для производства высококачественных филаментов.

Технология растворного смешивания используется преимущественно в научных целях и при создании филаментов с особыми требованиями к распределению порошков, несмотря на высокую экологическую и экономическую стоимость процесса.

Технология спекания после печати ориентирована на создание изделий из чистого металла и применяется для производства функциональных компонентов, где важны высокие механические характеристики. Она требует специализированного оборудования и сложной термической обработки, что ограничивает её применение в мелкосерийных и специализированных отраслях. В таблице 1 приведен сравнительный анализ различных технологий.

Таблица 1 – Сравнительный анализ технологий получения филамента

Критерий	Прямая экструзия	Компаундирование	Растворное смешивание	Спекание после печати
Сложность оборудования	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая
Однородность наполнителя	Средняя	Высокая	Очень высокая	Высокая
Максимальная доля наполнителя	До 50%	До 60%	До 50%	80–90%
Экологичность	Высокая	Высокая	Низкая (использование растворителей)	Высокая
Стоимость производства	400-800 руб/кг	1200-2000 руб/кг	2400-4000 руб/кг	6500- 12000 руб/кг
Тип конечного изделия	Полимерный композит	Полимерный композит	Полимерный композит	Чистый металл

Из анализа видно, что прямая экструзия и компаундирование являются оптимальными вариантами для массового производства полимерных филаментов с порошковыми наполнителями. Растворное смешивание используется в научных целях или для материалов с особыми свойствами, тогда как технология спекания ориентирована на получение полноценных металлических изделий.

Еще одним направлением получения качественного филамента является вторичное использование отходов полимерных пластиков, например ПЭТ-бутылок, которые измельчаются, очищаются от загрязнений, высушиваются и затем перерабатываются в гранулы или непосредственно экструдированы в филамент [5].

На начальном этапе ПЭТ-бутылки сортируют, удаляя этикетки и посторонние включения. После этого материал проходит стадию измельчения в хлопья (флейк), которые тщательно промываются и сушатся для удаления влаги. Далее возможны два подхода:

1. Прямая экструзия хлопьев в филамент — позволяет сократить этап гранулирования, но требует более точного контроля температуры и фильтрации.

2. Гранулирование с последующей экструзией в филамент — даёт стабильное качество сырья, повышает однородность.

Полученный филамент из переработанного ПЭТ (rPET) может применяться как в чистом виде, так и с добавлением армирующих или

функциональных наполнителей (в том числе порошков), обеспечивая экологичность и снижение себестоимости продукции.

Таким образом, выбор оптимальной технологии получения филамента с порошковым наполнением зависит от требований к свойствам конечного изделия, особенностей наполнителя и экономических факторов. Для массового производства полимерных композитных филаментов наиболее эффективными являются прямая экструзия и компаундирование. Растворное смешивание остаётся технологией для экспериментальных и малосерийных проектов. Для создания изделий из чистого металла после печати применяются высоконаполненные композиты с последующим спеканием, обеспечивая изделиям исключительные механические характеристики.

Исходя из вышеизложенного, наши дальнейшие исследования будут направлены на получение композитного филамента, получаемого из вторичного сырья, методом прямой экструзии из отходов ПЭТ бутылок с частичным оплавлением последних и прямым вводом порошка в процессе формирования филамента.

Литература:

1. Симонов, А.Ю. Технологические особенности получения порошков титана и его сплавов / А.Ю. Симонов, С.Ю. Пасечник // Металлургия XXI столетия глазами молодых : материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 28–29 мая 2024 года. – Донецк : ДОННТУ, 2024. – С.106-109.
2. Экструдер для пластика: устройство, принцип действия и разновидности [Электронный ресурс] // МеталлДВ. – URL: <https://metdveri59.ru/info/ekstruder-dlya-plastika-ustrojstvo-princzip-dejstviya-i-raznovidnosti> (дата обращения: 08.05.2025).
3. Мягкий ПВХ [Электронный ресурс] // Buss AG. – URL: <https://busscorp.com/ru/industries/pvc-pelletizing/soft-pvc/> (дата обращения: 08.05.2025).
4. Ляпков, А. А. Полимерные аддитивные технологии / А. А. Ляпков, А. А. Троян. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 120 с. — ISBN 978-5-507-48773-8.
5. Власов, В.В. Технология получения филамента для 3D печати из вторичного полиэтилентерефталата // В.В. Власов, А.Н. Исаев, Т.А. Шалыгина, С.Ю. Воронина // Пластические массы. – 2022. – № 7–8. – С. 48–50. – DOI: 10.35164/0554-2901-2022-7-8-48-50.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ МПГ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ АВТОКАТАЛИЗАТОРОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ И ТЕНДЕНЦИЙ ИХ РАЗВИТИЯ

Слободин В.А.¹, Пахомов Р.А.², Бажин В.Ю.¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия

Металлы платиновой группы (МПГ) – платина (Pt), палладий (Pd) и родий (Rh) – занимают значительное место в современном промышленном производстве благодаря своим уникальным каталитическим, физико-химическим и коррозионностойким свойствам. Основное применение металлы получили в автомобильной промышленности (катализаторы), также рассматриваемые элементы применяются в электронике и электротехнике, химической промышленности, зеленых технологиях, медицине и ювелирном деле, и инвестиционной сфере, что делает их стратегически важными ресурсами. Однако ограниченность природных месторождений и возрастание потребности в этих материалах обуславливают необходимость эффективной переработки вторичных источников, в частности, отработанные автокатализаторы, или SAC, представляют собой значимый элемент вторичной переработки.

SAC содержат концентрации МПГ, превышающие их содержание в природных рудах [1, 2], что делает их ценным сырьем для вторичного использования. Тем не менее, уровень переработки SAC во многих странах остается недостаточно высоким, что приводит к значительным потерям ценных металлов и увеличивает экологическую нагрузку. Утилизация SAC позволяет не только сократить зависимость от добычи первичного сырья, но и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, включая снижение выбросов парниковых газов.

Целью данного исследования является сравнительный анализ существующих способов переработки отработанных автокатализаторов с акцентом на их эффективность, экономическую целесообразность и экологичность. Особое внимание уделяется развитию технологий извлечения МПГ, способствующим переходу к устойчивой металлургии и циркулярной экономике.

Основной задачей переработки SAC является эффективное извлечение МПГ, однако сложность процессов обусловлена низкой концентрацией целевых металлов и необходимостью утилизации образующихся отходов. В связи с этим актуальной остается разработка и оптимизация методов переработки, сочетающих высокую степень извлечения ценных компонентов с экологической безопасностью. В настоящее время применяются пиро-, гидро- и биометаллургические технологии, а также их комбинации, однако поиск наиболее эффективных и устойчивых решений продолжается [3, 4].

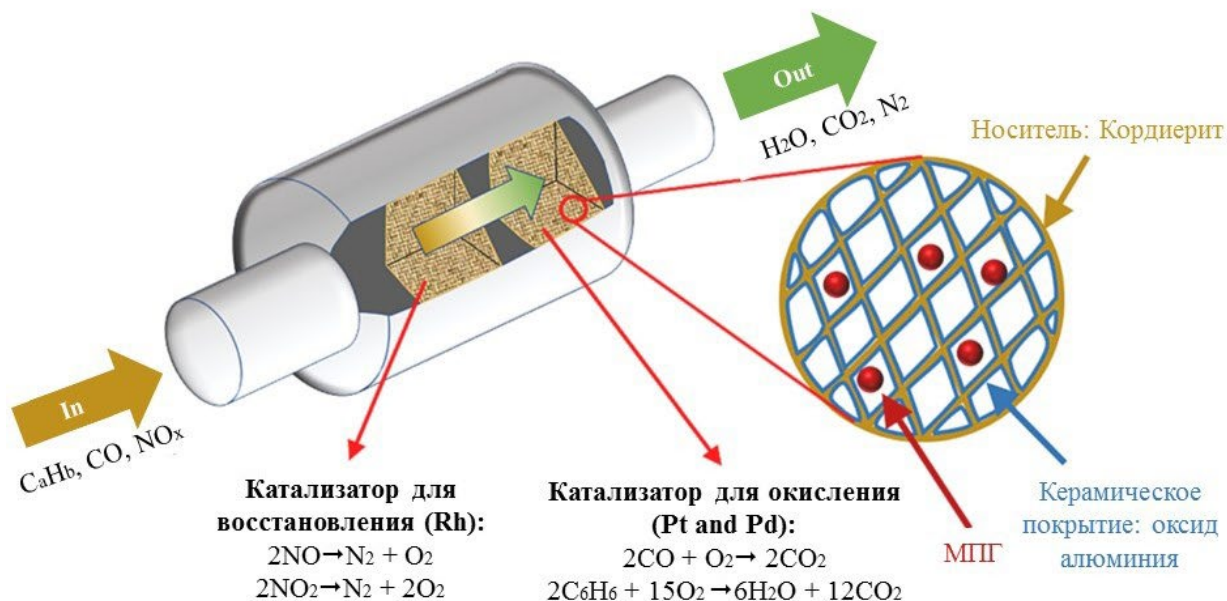


Рисунок 1 – Упрощенная схема автомобильного катализатора [3]

Пирометаллургия

Пирометаллургическая переработка минерального сырья и вторичных ресурсов основана на высокотемпературной плавке с флюсами и восстановителями, обеспечивающей разделение металлов платиновой группы (концентрирующихся в сплаве) и оксидных примесей (переходящих в шлак). Ключевыми параметрами процесса, определяющими его эффективность, являются температурный режим, состав флюсов, тип коллектора и продолжительность плавки, при этом особое значение имеют реологические характеристики шлаковой фазы, влияющие на сепарацию фазы коллектора (металлической, сульфидной и др) и оксидной фаз.

Основными ограничениями метода выступают высокая энергоемкость и значительный расход флюсующих материалов, что обуславливает его экономическую целесообразность преимущественно для крупнотоннажного производства. Современные исследования в данной области направлены на разработку энергосберегающих технологических решений и минимизацию отходов, что позволит снизить экологическую нагрузку металлургического производства [5, 6].

Гидрометаллургия

Гидрометаллургическая переработка отработанных автокатализаторов основана на кислотном выщелачивании с последующим выделением металлов платиновой группы из раствора. Наибольшую эффективность показывают системы, сочетающие минеральные кислоты с окислителями, благодаря способности МПГ образовывать устойчивые хлоридные комплексы. При этом наблюдаются существенные различия в кинетике растворения отдельных металлов - платина и палладий демонстрируют более высокие показатели извлечения по сравнению с родием.

Ключевым фактором повышения эффективности процесса является предварительная обработка сырья, включающая механическое измельчение и различные методы активации. Перспективным направлением представляется разработка селективных методов растворения МПГ с использованием органических растворителей.

Основные технологические преимущества гидрометаллургического подхода включают относительно низкие энергозатраты и возможность переработки материалов с низким содержанием ценных компонентов. Однако метод имеет существенные ограничения, связанные с необходимостью очистки сточных вод и трудностями селективного выделения отдельных МПГ [7].

Биометаллургия

Биогидрометаллургические методы извлечения металлов, основанные на использовании микроорганизмов (бактерий и грибов), демонстрируют значительный потенциал для экологически безопасной переработки минерального сырья. Применение биоцианирования с использованием *Chromobacterium violaceum* позволяет достигать извлечения до 95% Pt и Pd, что сопоставимо с традиционными методами.

Эффективность процессов может быть повышена за счет комбинации с физико-химическими методами предварительной обработки, такими как ультразвуковая активация и кислотное выщелачивание, что способствует удалению мешающих металлов (Cu, Zn) и улучшает последующее биовыщелачивание. Использование различных штаммов микроорганизмов (*Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium*) обеспечивает селективность извлечения, особенно для Rh (до 91%).

Основными ограничениями для промышленного внедрения остаются медленная кинетика биологических процессов, чувствительность микроорганизмов к токсичным компонентам и технологические сложности масштабирования [8].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика существующих процессов переработки отработанных автомобильных катализаторов [9]

Параметр	Пирометаллургия	Гидрометаллургия	Биометаллургия
Извлечение, %	95-99	90-98	40-95
Энергозатраты	Высокие	Средние	Низкие
Капитальные затраты	Очень высокие	Средние	Низкие
Экологичность	Низкая	Умеренная	Высокая

Современные тенденции развития технологий

В пирометаллургии наблюдается устойчивый тренд к снижению энергопотребления и температуры плавки, при сохранении высокой степени извлечения МПГ (до 99%). При этом сохраняются проблемы высоких капитальных затрат и необходимости сложных систем газоочистки

Гидрометаллургические методы эволюционируют в сторону снижения агрессивности процессов за счет замены традиционных окислителей (HNO_3/Cl_2) на менее токсичные альтернативы (H_2O_2 , NaClO_3) и разработки замкнутых технологических циклов. Особое внимание уделяется оптимизации кинетики выщелачивания и селективности процессов в присутствии оксидных примесей.

Биометаллургические подходы, основанные на использовании микроорганизмов и ионных жидкостей, демонстрируют потенциал как экологичная альтернатива, но сталкиваются с проблемами медленной кинетики и сложностей масштабирования. Ключевые исследования в этой области направлены на создание специализированных штаммов микроорганизмов и разработку замкнутых реагентных циклов.

Современные исследования в области переработки автокатализаторов демонстрируют переход от узконаправленного извлечения металлов платиновой группы (0,1% массы) к комплексной утилизации всех компонентов. Наблюдается развитие технологий трансформации кордиеритовой основы в стеклокерамические материалы или растворимые соединения алюминия и магния. [10].

Ключевой тенденцией является разработка комбинированных пиро-гидрометаллургических процессов, обеспечивающих полную переработку материала с получением товарных продуктов (керамики, полировальных порошков, химических реагентов). Основные технологические вызовы связаны с оптимизацией параметров процессов и созданием экономически целесообразных схем разделения компонентов, что необходимо для промышленного внедрения безотходных технологий. Особое внимание уделяется минимизации экологического воздействия при сохранении высокой эффективности извлечения ценных компонентов.

Литература:

1. Александрова Т.Н., О'Коннор К. Переработка руд металлов платиновой группы в России и Южной Африке: текущее состояние и перспективы // Журнал Горного института. – 2020. – Том 244. – С. 462-473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9
2. Бодуэн А. Я., Фокина С. Б., Фёдоров А. Т., Петров Г. В. Технологическое усовершенствование процесса адсорбционной концентрации платиновых металлов из хлоридных растворов после гидрометаллургической переработки малосульфидных флотационных концентратов // Горный журнал. – 2023. – №10. – С. 34-40. DOI: 10.17580/gzh.2023.10.04
3. Xia J., Ghahreman A. Platinum group metals recycling from spent automotive catalysts: metallurgical extraction and recovery technologies // Separation and Purification Technology. – 2023. – Т. 311. – С. 123357. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123357>
4. Kulikov M., Kopishev E. Review: Extraction of platinum group metals from catalytic converters // Bull. LN Gumilyov Eurasian Natl. Univ. Chem. Geogr. Ecol.

Ser. – 2023. – Т. 142. – С. 36-73. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2023-142-1-37-71>

5. Пахомов Р.А., Фокина С.Б., Мушихин Е.А., Щербаков С.В. Использование многокомпонентных диаграмм состояния шлаковых систем применительно к переработке отработанных автомобильных катализаторов // Цветные металлы. – 2023. – №2. – С. 49-59 DOI:10.17580/tsm.2023.02.07

6. Wang Z., Wei Q. L., Shi C. B., et al. Effect of Al₂O₃/SiO₂ mass ratio and CaO content on viscosity and structure of slag for pyrometallurgical processing of spent automotive catalysts // Journal of Iron and Steel Research International. – 2024. – Т. 31. – №. 3. – С. 608-621. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01181-x>

7. Paiva A.P., Piedras F.V., Rodrigues P.G., Nogueira C.A. Hydrometallurgical recovery of platinum-group metals from spent auto-catalysts—focus on leaching and solvent extraction // Separation and purification technology. – 2022. – Т. 286. – С. 120474. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120474>

8. Grilli M. L. et al. Platinum group metals: Green recovery from spent auto-catalysts and reuse in new catalysts—A review // Crystals. – 2023. – Т. 13. – №. 4. – С. 550. <https://doi.org/10.3390/cryst13040550>

9. Karim S., Ting Y. P. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: A review on conventional approaches and bio-processes // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Т. 170. – С. 105588. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105588>

10. Trinh H. B., Lee J. C., Suh Y. J., Lee J. A review on the recycling processes of spent auto-catalysts: Towards the development of sustainable metallurgy // Waste Management. – 2020. – Т. 114. – С. 148-165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.030>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ КОРОВОАТОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС

Гавриченко А.В., Закарлюка С.В., Шевелев А.И.
Донецкий национальный технический университет

Коробоватость полос является одним из видов дефектов плоскостности тонколистовой прокатки. Неплоскостность относится к тем видам дефектов проката, которые наиболее трудно измерить в потоке производства. Практически на всех технологических участках тонкая полоса обрабатывается с натяжением, которое влияет на точность измерения.

В настоящее время существует большое количество способов и устройств для измерения неплоскостности, рассмотренных в работах [1-3]. Эти способы позволяют измерять неплоскостность полос и листов с различным уровнем натяжения, не универсальны и отличаются достаточной сложностью оборудования.

В работе [4] предложена математическая модель, повышающая точность измерения неплоскостности с учетом фактора натяжения для волнистых полос.

Целью данной работы является совершенствование математической модели определения несимметричной неплоскостности с учетом ее упругого натяжения для полос с несимметричной коробоватостью.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние коробоватых полос с несимметричной неплоскостностью для квадратичного закона распределения напряжений натяжения по ширине (рисунок 1) в виде уравнения:

$$\sigma_x = \Delta\sigma \left[\frac{4}{B^2}(x-l)^2 - \frac{4}{B}(x-l)+1 \right], \quad (1)$$

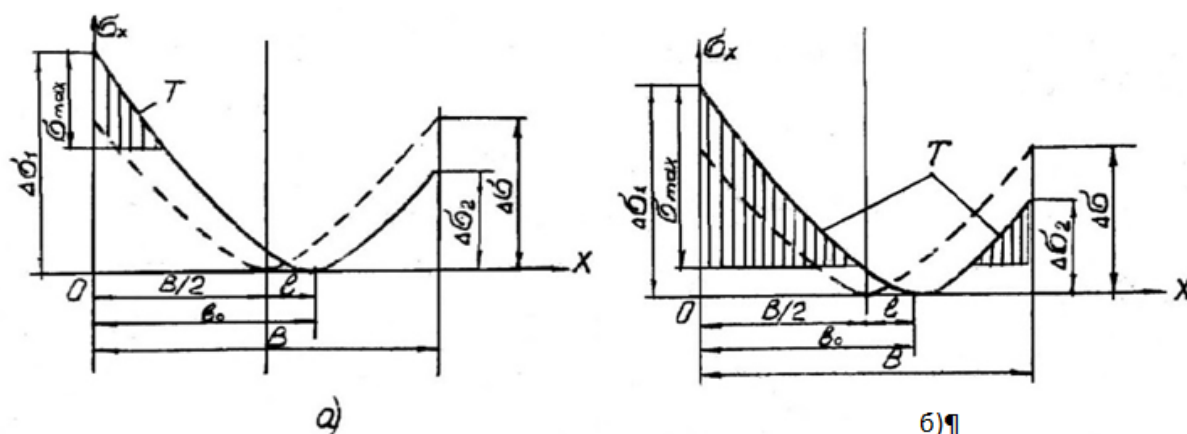
где $\Delta\sigma$ - неравномерность напряжений натяжения между кромками и серединой коробоватой полосы до смещения эпюры σ_x (в случае, если бы полоса имела симметричную коробоватость); B – ширина полосы; l - величина смещения эпюры σ_x относительно оси полосы.

Для установления связи между параметрами неплоскостности до и после приложения натяжения при упругом растяжении использовали зависимость, представленную в работе [5]:

$$A = \sqrt{A_0^2 - \frac{4\lambda_0^2 \sigma_{\max}}{E\pi^2}}, \quad (2)$$

где A – амплитуда неплоскостности после приложения натяжения к полосе; A_0, λ_0 – амплитуда и период неплоскостности до приложения натяжения к полосе; $\sigma_{\max}$ – максимальные напряжения натяжения по ширине полосы, E – модуль упругости материала полосы. Величину $\sigma_{\max}$ определяли в зависимости от величины коробоватости, его несимметричности, закона распределения

напряжений натяжения по ширине полосы σ_x и величины $\sigma_{уд} = T/Bh$, где T – сила натяжения полосы, h – толщина полосы.



- а) – напряжения натяжения действуют только по левой кромке полосы;
 б) - напряжения натяжения действуют по обеим кромкам полосы

Рисунок 1 - Эпюры распределения напряжений натяжения по ширине полосы с несимметричной коробоватостью при упругом растяжении

В работе [6] получены зависимости, из которых можно определить $\sigma_{\max}$ для несимметричной коробоватости и параболического закона σ_x :

– при $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$

$$\sigma_{уд} = \sigma_{\max} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{B} \right) - \frac{(\Delta\sigma_1)^{3/2} - (\Delta\sigma_2)^{3/2}}{3\sqrt{\Delta\sigma}}, \quad (3)$$

– при $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$

$$\sigma_{уд} = \sigma_{\max} - \frac{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)}{2} + \frac{1(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)}{B} - \frac{(\Delta\sigma_1)^{3/2} + (\Delta\sigma_2)^{3/2}}{3\sqrt{\Delta\sigma}} + \frac{2(\Delta\sigma_1 - \sigma_{\max})^{3/2}}{3\sqrt{\Delta\sigma}}; \quad (4)$$

Из анализа напряженного состояния коробоватых полос следует, что переход полосы из неплоского состояния (закритического) в плоское (докритическое) при упругом растяжении происходит при одном и том же уровне натяжения.

Таким образом, измерив силу натяжения полосы в момент перехода ее из одного напряженно-деформированного состояния в другое, можно рассчитать величину истинной неплоскостности. Измерение силы натяжения полосы более простой прием, чем измерение, например, распределения напряжений натяжения по ширине и существует практически на всех участках, создающих натяжение. Фиксировать момент перехода полосы из неплоского состояния в плоское (или наоборот) можно с помощью простейших датчиков или визуально, что значительно упрощает процесс измерения.

Для определения несимметричной коробоватости необходимо фиксировать напряжение натяжения $\sigma_{уд02}$ в момент перехода полосы из неплоского состояния в плоское, (когда $\sigma_{\max} = \Delta\sigma_1$) (рисунок 1, б).

Подставив в (4) вместо $\sigma_{\max}$ значение $\Delta\sigma_1$, получим:

$$\sigma_{уд0} = \Delta\sigma_1 - \frac{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)}{2} + \frac{1(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)}{B} - \frac{(\Delta\sigma_1)^{3/2} + (\Delta\sigma_2)^{3/2}}{3\sqrt{\Delta\sigma}} \quad (5)$$

Принимая то, что величина несимметричной коробоватости определяется максимальной неравномерностью деформаций по ширине полосы, получим:

$$\Delta\sigma_1 = \alpha_B E \left(\frac{A_0^1 \pi}{2\lambda_0^1} \right)^2 \quad (6)$$

где A_0^1, λ_0^1 - амплитуда и период коробоватости полосы до приложения натяжения ($\lambda_0^1 = 1000 \text{ мм/м}$), α_B - коэффициент, учитывающий материальную связь участков по ширине полосы ($\alpha_B \approx 1$).

Исходя из граничных условий (рисунок 1):

$$\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma \left(\frac{2l}{B} - 1 \right)^2 \quad (7)$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 / \left(\frac{2l}{B} + 1 \right)^2. \quad (8)$$

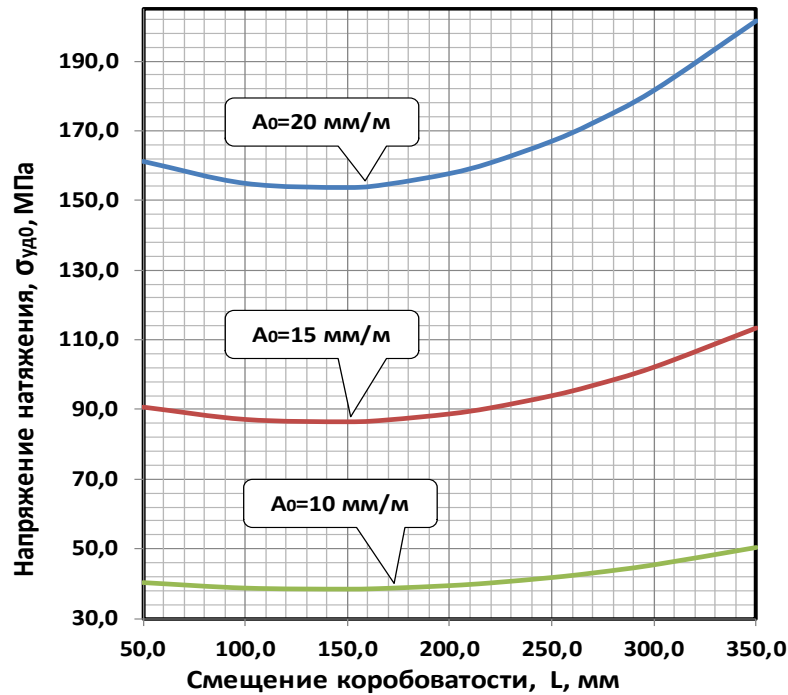


Рисунок 2 - График определения напряжения натяжения, при котором амплитуда коробоватости равна нулю (упруго скрыта в полосе)

Выражение (5) упростим, подставляя в него (7) с учетом (8):

$$\sigma_{уд0} = \Delta\sigma_1 \left\{ 1/6 + \frac{(2l/B - 1)^2}{(2l/B + 1)^2} - \frac{(1 - 2l/B)^3}{3(2l/B + 1)} + \frac{l}{B} \left[1 - \frac{(2l/B - 1)^2}{(2l/B + 1)} \right] \right\} \quad (9)$$

Решив (9) относительно $\Delta\sigma_1$ из (6) находим величину коробоватости.

Для примера на рисунке 2 приведено графическое решение уравнения (9) для стальной полосы ($E=2,1 \cdot 10^5$ МПа) шириной $B = 1500$ мм.

Из рисунка 2 видна связь между и напряжением натяжения и смещением коробоватости в момент перехода полосы из неплоского состояния в плоское ($A' = 0$ мм/м) для разных величин исходной коробоватости $A_0=10-20$ мм.

Вывод.

1. На основе проведенных теоретических исследований разработана математическая модель и получены зависимости для определения амплитуды несимметричной коробоватости по величине натяжения с учетом смещения дефекта относительно оси в момент перехода полосы из неплоского состояния в плоское и наоборот.

2. Разработанная модель может быть полезна при измерении коробоватости тонких полос с учетом фактора натяжения.

Литература:

1. Сергеев, А.С. Современные системы регулирования плоскостности полос за рубежом / А.С. Сергеев // Черная металлургия, Бюл. ин-та «Черметинформация», 1985, №21, С. 11-27.

2. Божков, А.И. Плоскостность тонколистового проката / А.И. Божков, В.П. Настич. – Москва: «СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ», 1998. – 264 с.

3. Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке: монография / С.М. Бельский, И.П. Мазур, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин – Темиртау: КГИУ, 2016. – 161 с.

4. Гавриченко, А.В. Математическая модель определения несимметричной волнистости тонких полос / А.В. Гавриченко, С.В. Закарлюка, А.И. Шевелев // Металлургия XXI столетия глазами молодых / Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Донецк: ДонНТУ, 2024. - С. 136-140.

5. Анализ напряженно-деформированного состояния неплоских полос при растяжении / В.М. Клименко, В.М. Богатырев, С.В. Закарлюка и др. // Известия вузов. Черная металлургия, 1986, № 10. –С.54-57.

6. Изменение параметров неплоскостности при упругом растяжении полос / С.В. Закарлюка, Ю.И. Юрченко, Е.В. Гончаров и др. // В кн.: Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.Б. Моллера. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. - Вып. 24. - С. 3-12.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ РАСКАТОВ ПРИ ПОЭТАПНОЙ РАЗДАЧЕ ШИРИНЫ

Глазунов А.В., Закарлюка С.В.
Донецкий национальный технический университет

В технологии прокатки горячекатаных широких полос в качестве заготовок в последнее время используют непрерывнолитые слябы. Для сохранения высокой производительности машин непрерывной разливки и снижения парка кристаллизаторов стараются разливать крупногабаритные слябы с незначительной градацией по ширине. Учитывая, что длина длинномерных заготовок превышает длину бочки валков, для изменения ширины используют в основном редуцирование (уменьшение) ширины литых слябов путем деформации боковых кромок в прессе или прокатки в вертикальных валках [1,2].

Как альтернативу редуцированию при прокатке применяют раздачу (увеличение) ширины исходного сляба. Это можно выполнить, например, путем прокатки сляба «на угол» [3]. Величина уширения в этом случае зависит от вытяжки раската и угла задачи относительно оси валков, что значительно сужает регулирование ширины длинномерных слябов. В работе [4] предлагается увеличивать ширину исходного сляба постадийным обжатием раската по ширине в профилированных верхних и цилиндрических нижних валках. Постадийное обжатие предлагается производить от периферийных участков к центральному участку раската на величину 0,25-0,33 ширины листа. Эффективность предложенного способа прокатки по критерию уширение по сравнению с традиционной прокаткой слябов рассмотрено в работе [5]. Однако, при такой схеме деформации происходит значительная неравномерность деформации по ширине проката, что приводит к искажению формы в плане, отличной от прямоугольной и требует дальнейших исследований.

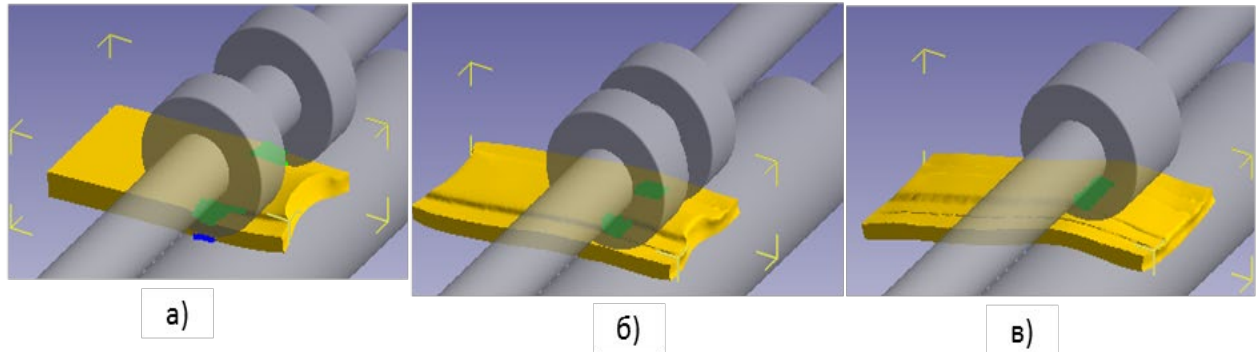
Целью настоящей работы является исследование математическим моделированием формирования формы в плане при раздаче ширины слябов с неравномерной деформацией по ширине проката.

В данной работе проведены исследования компьютерного моделирования процесса раздачи сляба в комплекте прокатных валков с применением метода конечно-элементного моделирования в среде DEFORM 3D. Верхний валок выполнен в виде двух кольцевых выступов диаметром 55 мм, шириной 20 мм симметрично оси прокатки. Нижний валок в виде гладкой бочки диаметром 55 мм. Размеры прокатываемого сляба 10x55x100 мм, материал - свинец. Моделирование процесса прокатки сляба провели в гладких цилиндрических валках. Тип объекта валков - жесткий недеформируемый, условия деформирования - изотермические. В качестве модели контактного трения использовали модель Э. Зибеля.

Моделирование прокатки проведено при комнатной температуре, без смазки, с зазором между валками в каждом проходе 7 мм. Прокатку провели

поэтапно за три прохода путем последовательного обжатия по ширине от краевых (периферийных) участков к центральному. В первом проходе провели обжатие левого и правого краевых участков сляба шириной по 9,2 мм.

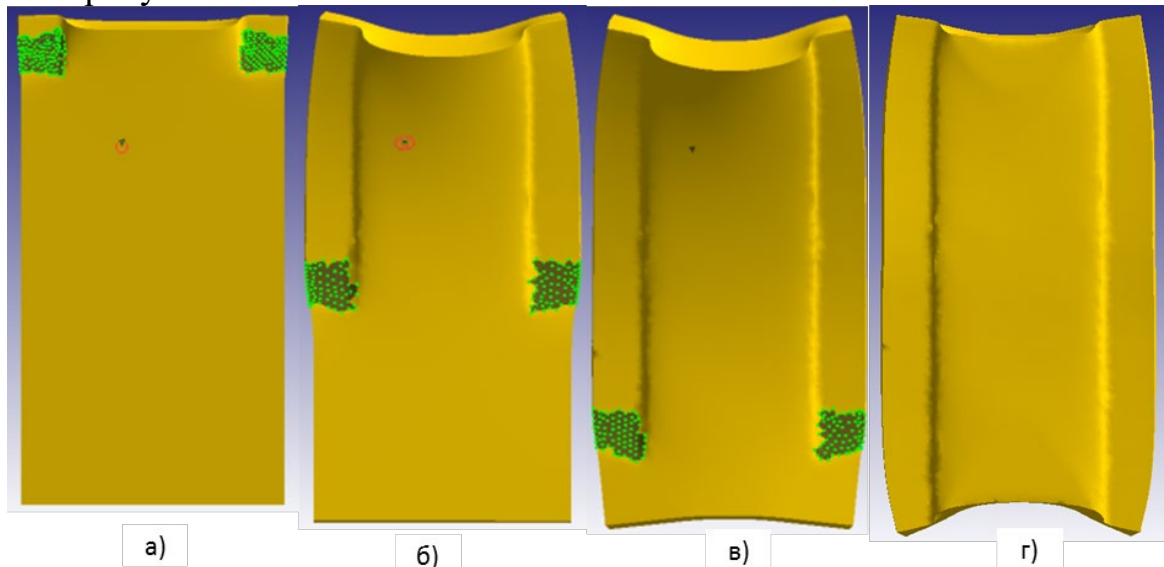
Поэтапный процесс прокатки сляба по проходам, начиная от крайних участков и заканчивая средней части, раската показан на рисунке 1.



а – 1-ый проход; б – 2-ой проход; в – 3-ий проход

Рисунок 1 – Поэтапный процесс прокатки сляба по проходам

Внешний вид раската в плане в процессе прокатки первого прохода показан на рисунке 2.



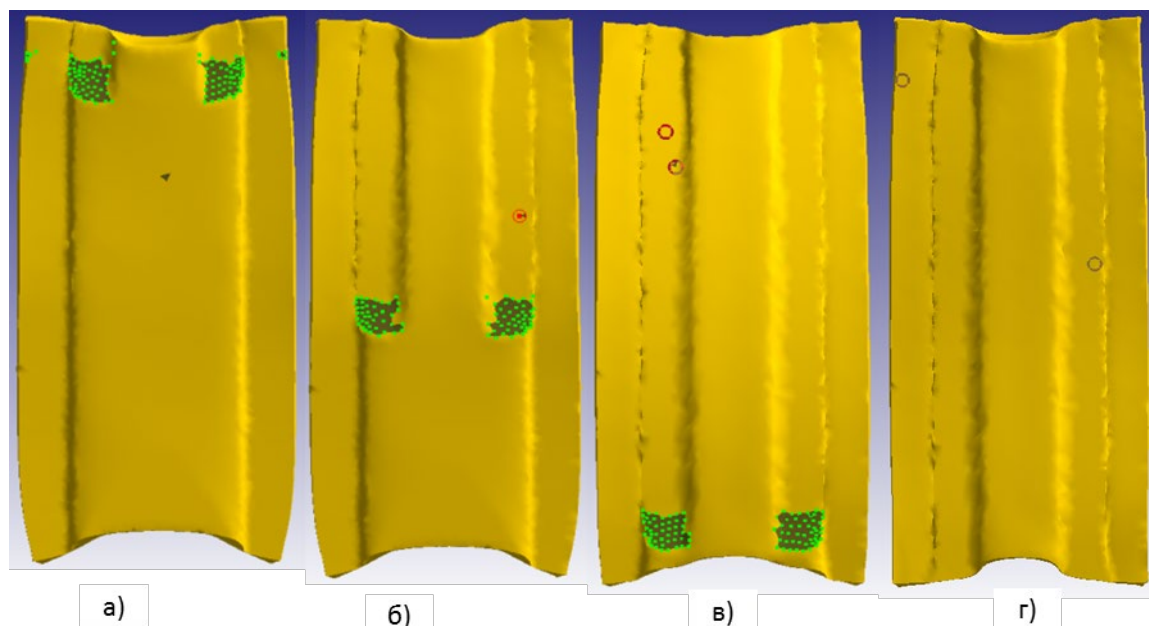
а – в начале прокатки; б – в середине прокатки; в – в конце прокатки; г – после 1-го прохода (затемненный участок – очаг деформации)

Рисунок 2 – Внешний вид раската в плане в процессе прокатки первого прохода

Из рисунка 2 видна динамика изменения формы в плане в процессе прокатки первого прохода: в самом начале прохода передний конец уширяется и имеет веерообразную форму. В середине прокатки передний конец имеет вогнутость и утяжку ширины. В конце прокатки начинает формироваться вогнутость заднего конца. Ширина заднего конца начинает уменьшаться и после окончания 1-го прохода утяжка достигает максимума. При этом величина

вогнутости и утяжка заднего конца превышает передний.

Во втором проходе провели обжатие средних участков сляба шириной по 9,2 мм. Внешний вид раската в плане в процессе прокатки второго прохода показан на рисунке 3.



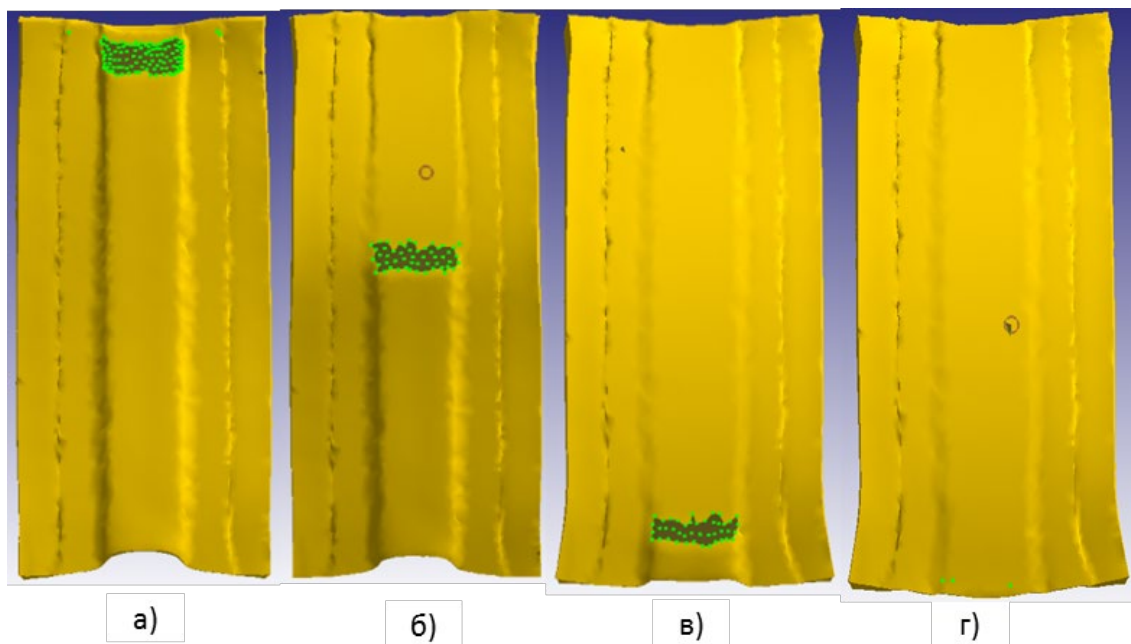
а – в начале прокатки; б – в середине прокатки; в – в конце прокатки;
г – после 2-го прохода (затемненный участок – очаг деформации)

Рисунок 3 – Внешний вид раската в плане в процессе прокатки второго прохода

Из рисунка 3 видна динамика изменения формы в плане в процессе прокатки второго прохода: в начале вогнутый передний конец частично начинает заполняться металлом и приобретает незначительную веерообразность. В середине прокатки передний конец имеет вогнутость и незначительную утяжку ширины. В конце прокатки начинает заполняться задний конец раската, оставаясь вогнутым. Ширина заднего конца начинает увеличиваться и после окончания 2-го прохода утяжка практически исчезает. При этом величина вогнутости переднего и заднего концов остается примерно одинаковой.

В третьем проходе провели обжатие оставшегося среднего (осевого) участка сляба шириной 18,4 мм. Внешний вид раската в плане в процессе прокатки третьего прохода показан на рисунке 4.

Из рисунка 4 видна динамика изменения формы в плане в процессе прокатки третьего прохода: в начале немного расширенный передний конец практически заполняется металлом и немного остается вогнутым. В середине прокатки передний и задний концы практически не меняют своей формы. В конце прокатки задний конец становится выпуклым, полностью заполняется металлом и формируется его веерообразность. После окончания 3-го прохода веерообразность и выпуклость заднего конца достигает максимума. При этом величина веерообразности заднего конца превышает передний.



а – в начале прокатки; б – в середине прокатки; в – в конце прокатки; г – после 3-го прохода (затемненный участок – очаг деформации)

Рисунок 4 – Внешний вид раската в плане в процессе прокатки третьего прохода

Вывод.

1. На основе конечно-элементного моделирования раздачи ширины сляба при поэтапном деформировании участков от крайних участков к центральному, показана динамика формирования формы в плане по проходам.

2. Показано, что от прохода к проходу форма в плане раската улучшается и в третьем проходе передний конец становится близкий к прямоугольному, а задний – выпуклый и имеет некоторое веерообразное расширение.

Литература:

1. Чижигов, Ю.М. Редуцирование и прокатка металла непрерывной разливки / Ю.М. Чижигов – М. : Металлургия, 1974. – 384с.
2. Шабалов, И.П. Ресурсосберегающие технологии производства толстолистного проката с повышенными потребительскими свойствами / И.П. Шабалов, З.К. Шафигин, А.Н. Муратов. - М.: Металлургиздат, 2007. – 352 с.
3. А.с. 1324695 СССР, В21В 1/38. Способ прокатки листов, Богатырев В.М., Онищенко А.М., Следнев В.П. и др., № 4045164/31-02 заявл. 28.03.86, опубл. 23.07.87, Бюл. №27.
4. А.с. 1205948, В21В 1/38, Способ прокатки толстых листов и полос в черновых клетях, Коновалов Ю.В., Руденко Е.А., Шевцов В.К., № 3764222/22-02 заявл. 02.07.84, опубл. 23.01.86, Бюл. №3.
5. Закарлюка, С.В. Моделирование раздачи ширины непрерывнолитых слябов в профилированных прокатных валках / С.В. Закарлюка // Физика и техника высоких давлений, 2025, том 35, №1. – С.104-109.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС К ПОТЕРЕ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ

Гордиенко В.М., Закарлюка С.В.
Донецкий национальный технический университет

Плоскостность является одним из основных показателей качества листового проката. Чем тоньше и шире полоса, тем сложнее получить плоский прокат удовлетворяющий требованиям ГОСТа на протяжении всей компании работы прокатных валков.

Улучшение плоскостности листов и полос является одним из путей снижения отсортировки некачественной продукции при прокатке, стабилизации технологии производства, как у производителя, так и у потребителя. Например, обработка неплоских полос приводит к увеличению вероятности их обрывности, задирам, рискам на поверхности проката, разнотолщинности цинкового покрытия при нанесении горячим способом и др.

Неплоскостность относится к тем видам дефектов листового проката, которые наиболее трудно контролируются и исправляются. Различают множество видов неплоскостности листов и полос, в том числе: волнистость, коробоватость, одновременное наличие коробоватости и волнистости, односторонняя волнистость, локальная, несимметричная и др.

Механизм образования неплоскостности связан с неравномерностью вытяжек в различных продольных сечениях по ширине полосы. Это приводит к появлению дополнительных остаточных напряжений в полосе. На участках с большей деформацией возникают сжимающие напряжения, с меньшей деформацией – растягивающие.

При появлении остаточных сжимающих напряжений на участке полосы, может произойти потеря плоской формы. Для того, чтобы участок полосы не потерял плоскую форму, необходимо выполнение следующего условия:

$$\sigma_{сж} < \sigma_{кр}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ – сжимающие остаточные напряжения, приложенные к участку полосы; $\sigma_{кр}$ – критическое сжимающее напряжение для рассматриваемого участка полосы.

Из формулы (1) следует, что устойчивость полосы к потере плоской формы тем выше, чем выше критические напряжения $\sigma_{кр}$ участка полосы (при прочих равных условиях). Из теории расчета гибких пластин [1] известна формула критического напряжения сжатия, при котором пластина теряет устойчивость:

$$\sigma_{кр} = \kappa_1 \kappa_2 \left(\frac{h}{b} \right)^2, \quad (2)$$

где κ_1 – коэффициент, который зависит от отношения длины (a) к ширине (b) пластины и от условий ее закрепления;

$K_2 = \frac{\pi^2 E}{12(1-\gamma^2)}$ – показатель, зависящий от упругих свойств пластины (модуля упругости E и коэффициента Пуассона γ).

В основном для управления плоскостностью используют наиболее многочисленные, сложные и дорогостоящие системы, основанные на снижении остаточных продольных напряжений. В меньшей степени изучены более простые и достаточно эффективные способы, основанные на принципе увеличения критических напряжений к потере плоской формы полосы.

Из формулы (2) следует, что увеличить $\sigma_{кр}$ можно за счет уменьшения ширины участков, на которых действуют сжимающие напряжения. Такое напряженное состояние в полосе можно реализовать путем дробления деформаций за счет чередования большего и меньшего уровня деформаций на локальных участках, располагая эти участки вдоль полосы.

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение того, что дробление деформаций (остаточных напряжений) с расположением чередующихся с большей и меньшей деформацией прямоугольных участков вдоль полосы повышает устойчивость к потере плоской формы.

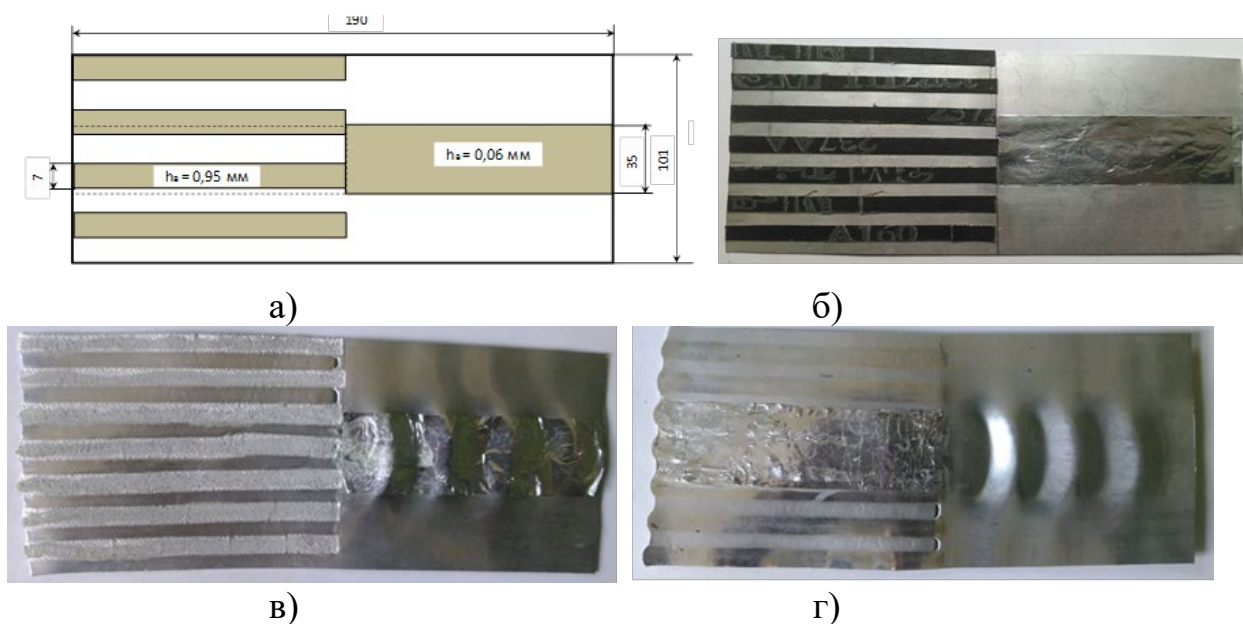
Для качественного подтверждения стабилизации плоскостности полос с применением предложенной схемы дробления деформаций (остаточных напряжений) был проведен лабораторный эксперимент.

Для получения в полосе напряженного состояния, повышающего устойчивость к потере плоской формы, использовали гладкие валки стана дуо 100 с прокаткой в них алюминиевых полос совместно с наклеенной наждачной бумагой в виде параллельных прямоугольников, обращенной зернистостью к прокату по методике аналогичной в работах [2, 3]. Прокатку проводили без смазки и натяжения.

На рис. 1 приведена схема и внешний вид экспериментального образца алюминиевой полосы толщиной 0,61 мм, длиной 190 мм, шириной 101 мм до и после прокатки (общая вытяжка после прокатки $\mu = 1,10$). Часть полосы имеет участок с наклеенной наждачной бумагой в виде полосок шириной по 7,0 мм. Образец имеет по оси утолщение $\delta=0,06$ мм шириной 35 мм по всей длине образца, которое при обычной прокатке приводит к образованию коробоватости. Утолщение получено с помощью наклеенной алюминиевой фольги.

Для сравнения способа прокатки, основанном на дроблении остаточных напряжений, с традиционным процессом (при одной и той же настройке стана), прокатывали вторую половину одной и той же полосы с гладкой поверхностью.

Из рис. 1 видно, что на участке полосы, прокатанного по традиционной технологии, имеется коробоватость (за счет предварительно созданного посередине утолщения с помощью фольги). На участке полосы с полосчатым расположением участков с разным уровнем деформации происходит «подавление» коробоватости и полоса сохраняет плоское состояние. При этом на участках полосок, прокатанных с большим уровнем деформации, отсутствует локальная неплоскостность.



а - схема образца с полосчатым расположением участков неравномерной деформации; б - внешний вид образца до прокатки; в - внешний вид образца после прокатки; г - внешний вид образца с обратной стороны после прокатки
Рисунок 1 – Образец опытной алюминиевой полосы

Для оценки выравнивающего эффекта дробления деформаций в плоскости полосы была проведена следующая опытная прокатка. Взяли алюминиевую полосу толщиной 0,60 мм предварительно прокатанной с дефектом «коробоватость». На одной половине образца приклеили чередующиеся прямоугольные полоски наждачной бумаги шириной 6-7 мм параллельно кромки образца. Полоса была прокатана с общей вытяжкой после прокатки $\mu = 1,08$. Внешний вид опытного образца до и после прокатки приведен на рис. 2.



а - внешний вид коробоватого образца до прокатки; б - внешний вид образца после прокатки

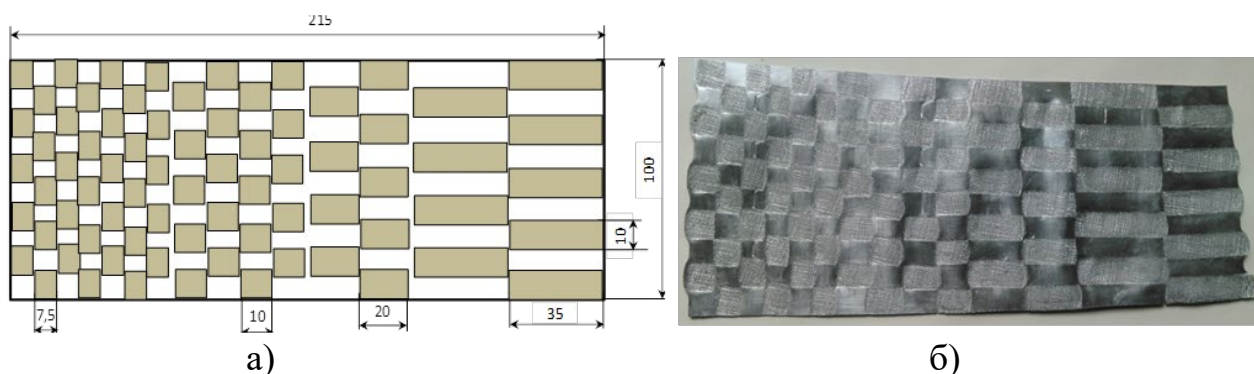
Рисунок 2 – Образец опытной алюминиевой полосы

Из рис. 2 видно, что дробление деформаций по ширине полосы устранило неплоскостность в виде коробоватости. В то время участок полосы, прокатанный по традиционной технологии в гладких валках, остался коробоватым.

С целью оценки влияния длины участков на локальную неплоскостность был проведен лабораторный эксперимент. На алюминиевой полосе толщиной

0,54 мм (215x100 мм), были наклеены полоски наждачной бумаги шириной 10 мм, длиной: 7,5; 10; 20; и 35 мм. Прокатку выполнили с общей вытяжкой $\mu = 1,09$.

Внешний вид опытного образца до и после прокатки приведен на рис. 3.



а – схема расположения участков опытного образца до прокатки;
б - внешний вид образца после прокатки

Рисунок 3 – Образец опытной алюминиевой полосы

Из рис. 3 видно, что все полосчатые прямоугольные участки с разной длиной не имеют локальной неплоскостности и нарушений сплошности.

Выводы.

1. На основе проведенных экспериментальных исследований при прокатке алюминиевых полос показано, что дробление деформаций по ширине листа, повышает устойчивость проката к потере плоской формы.

Определено, что длина полосчатых участков практически не влияет на локальную неплоскостность по сравнению с их шириной.

2. Рассмотренные варианты прокатки дробления деформаций на участках в виде полосок параллельных кромкам полосы позволяют исправлять неплоскостность проката, в том числе коробоватость.

3. Рассмотренную в работе схему напряженно-деформированного состояния можно реализовать, например, с помощью прокатки в валках с профилировкой в виде кольцевых проточек.

Литература:

1. Вольмир, А.С., Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир, Москва: Наука, 1967. - 984 с.

2. Повышение устойчивости катаных полос к потере плоской формы / Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, В.Е. Гончаров, Ю.И. Юрченко // Физика и техника высоких давлений. – 2020. - Том. 30. - № 4. - С. 99-106.

3. Экспериментальное исследование влияния дробления деформаций в плоскости тонких полос на устойчивость к потере плоской формы / Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, В.Е. Гончаров, В.В. Пилипенко // Физика и техника высоких давлений. – 2022. -Том 32, № 4.– С. 114-123.

КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА ДИАМЕТРОМ 957 ММ С 2-РАДИУСНЫМ ДИСКОМ

Токарь А.А., Яковченко А.В.

Донецкий национальный технический университет

Конструкция и размеры колес с плоскоконическим диском диаметром 957 мм для колесных пар тележек грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов определены ГОСТ 10791-2011 (рис. А.1) [1]. Колеса рассчитаны на осевую нагрузку 230,5 кН (23,5 тс). На практике они широко используются с середины прошлого столетия. Установлено [2, 3], что основным недостатком таких колес является образование локальных областей высоких напряжений, расположенных в зонах сопряжения диска с ободом и ступицей с внутренней стороны колеса.

Известно, что задача проектирования оптимальной формы и размеров диска колеса диаметром 957 мм по ГОСТ 10791-2011 не решена. Вместе с тем в целом колесо с плоскоконическим диском зарекомендовало себя хорошо, и объемы его производства ежегодно составляют сотни тысяч тонн.

В связи с этим разработка на его основе усовершенствованной конструкции колеса вполне оправдана. При этом актуально минимизировать напряжения в диске от действия эксплуатационных нагрузок.

Усовершенствованное низконапряженное колесо диаметром 957 мм с новым 2-радиусным диском (рис. 1) разработано в [4] на основе чертежа, приведенного в ГОСТ 10791-2011 на рис. А.1. Проектирование 2-радиусного диска выполнено на базе принципа «золотого сечения» и уравнения «цепной линии» по методике, предложенной в [5].

В настоящей работе поставлена задача определить коэффициент запаса сопротивления усталости $n_{у.к.}$ нового колеса, показанного на рис. 1.

Методика расчета коэффициента $n_{у.к.}$ представлена в ГОСТ 33783-2016 [6]. Расчет $n_{у.к.}$ выполнен для точки поверхности диска, в которой имеет место максимальный размах эквивалентных напряжений. При этом использовали схему нагружения, при которой одновременно прикладываются и вертикальная сила (в круге катания), и горизонтальная сила (в зоне гребня). Значения сил при этом с учетом осевых нагрузок 23,5 тс (230,5 кН), составляли: вертикальная - 234,2 кН; горизонтальная - 72,1 кН.

Коэффициент запаса сопротивления усталости колеса в значительной степени зависит от наибольшего значения амплитуды эквивалентных напряжений σ_{ai} и среднего эквивалентного напряжения цикла σ_{mi} , возникающих от динамических нагрузок в выбранной точке колеса. Значение σ_{ai} определяется как полуразность модулей эквивалентных напряжений при положении расчетного сечения колеса относительно точки контакта с рельсом в процессе его вращения под углами 0° и 180° . Значение среднего эквивалентного

Методика конечно-элементного расчета эквивалентных напряжений от действия указанных выше эксплуатационных нагрузок адаптирован в работе [5].

На базе методики [6] выполнили расчет коэффициента запаса сопротивления усталости колеса $n_{v.k.}$.

$$\sigma_{ai} = \frac{(\sigma_{(0)} - \sigma_{(180)})}{2} = \frac{(259 - 20,8)}{2} = 119,1 \text{ МПа.}$$

86

$$\sigma_{mi} = \frac{(\sigma_{(0)} + \sigma_{(180)})}{2} = \frac{((-259) + (-20,8))}{2} = -139,9 \text{ МПа.}$$

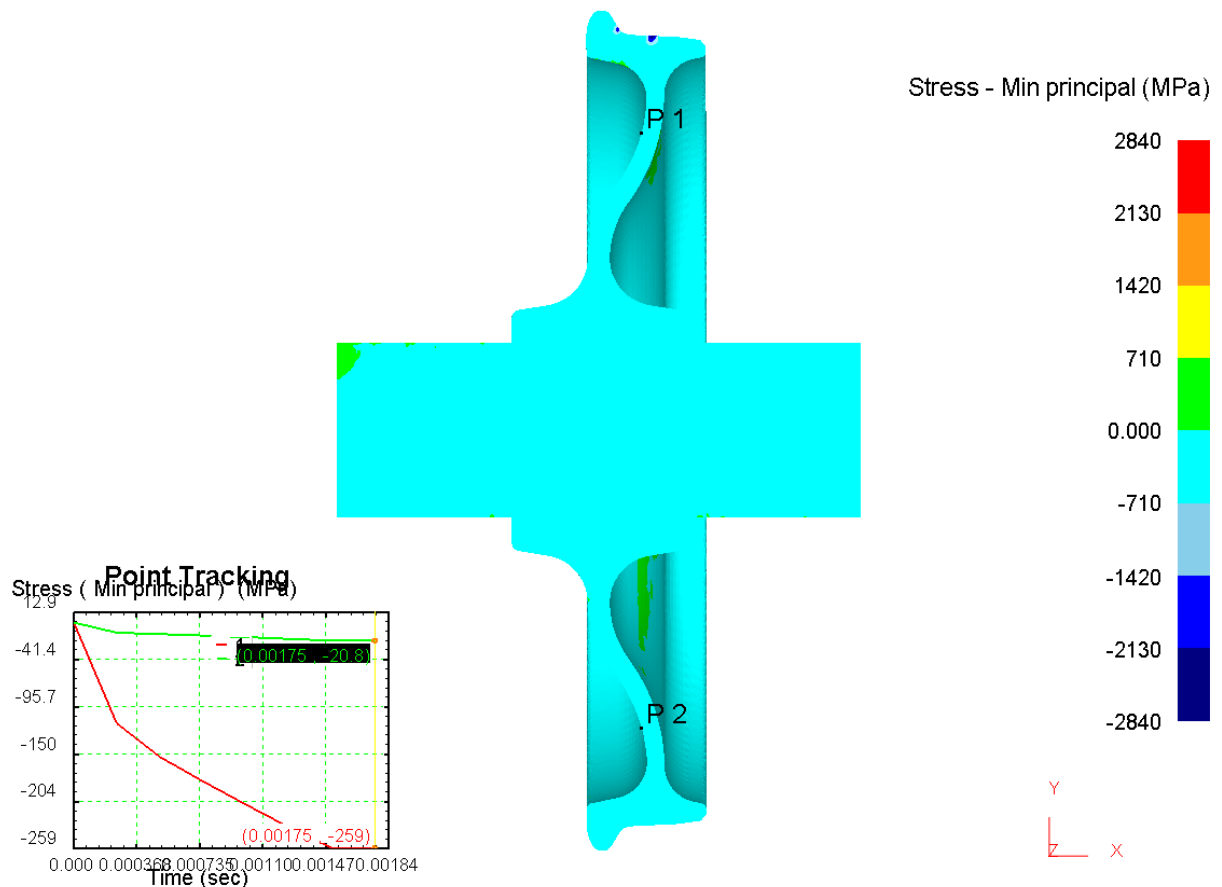


Рисунок 2 – Результаты конечно-элементного расчета эквивалентных напряжений в точках P_1 и P_2 (при $R=323$ мм) на поверхности 2-радиусного диска колеса учетом осевых нагрузок 230,5 кН (23,5 тс)

Коэффициент запаса сопротивления усталости колеса $n_{у.к.}$ определили по формуле [6]:

$$n_{у.к.} = \frac{\sigma_{a.д} k_2}{\sigma_{ai} k_1} \geq [n_{у.к.}],$$

где $[n_{у.к.}]$ – допускаемое значение запаса сопротивления усталости, принятое равным 1,5 (на базе экспериментальных данных по испытаниям на усталость натуральных колес);

$n_{у.к.}$ – коэффициент запаса сопротивления усталости колеса;

$\sigma_{a.д}$ – предел выносливости колеса, полученный в условиях стендовых натуральных испытаний при асимметричном цикле нагружения регулярным круговым изгибом с учетом действия монтажных и остаточных напряжений $\sigma_{a.д} = 140$ МПа;

Коэффициент k_1 для этого случая (сталь марки 2) равен 0,895 [6].

Рассчитаем коэффициент k_2 :

$$k_2 = 1,0 - 0,42 \left(\frac{\sigma_{mi}}{\sigma_T} \right),$$

где σ_T - предел текучести материала цельнокатаного колеса ($\sigma_T = 400$ МПа [6] для цельнокатаного серийного колеса, изготовленного из стали марки 2 в соответствии с требованиями ГОСТ 10791-2011)

$$k_2 = 1 - 0,42 \left(\frac{-139,9}{400} \right) = 1,147,$$

$$n_{y.k.} = \left(\frac{140 \cdot 1,147}{119,1 \cdot 0,895} \right) = 1,51.$$

Коэффициент запаса сопротивления усталости в зоне диска колеса [4] с его внутренней стороны при $R=323$ мм в точках, в которых имеет место максимальный размах эквивалентных напряжений, получен равным $n_{y.k.} = 1,51$, что удовлетворяет требованию ГОСТ 33783-2016.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023020900002-3-1.2.1;1.4.3).

Литература:

1. ГОСТ 10791–2011. Межгосударственный стандарт «Колеса цельнокатаные. Технические условия». – Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2011. – 38 с.
2. Особенности деформирования железнодорожных колес с плоскоконическими и криволинейными дисками / А.Я. Кузовков [и др.] // Сталь. – 2002. – № 3. – С. 84-87.
3. Пашолок, И. Л. Разработка критериев работоспособности дисков цельнокатаных колес для грузовых вагонов нового поколения / И. Л. Пашолок, В. Н. Цюренко, А. С. Разумов // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 3. – С. 19-23.
4. Обоснование параметров ресурсосберегающей технологии штамповки и прокатки железнодорожных колес на базе автоматизированного проектирования калибровок / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, А. А. Токарь // Физика и техника высоких давлений Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина. — Донецк: ГУ ДонФТИ, 2024. — Том 34, №3. — С. 111–124.
5. Снитко, С. А. Автоматизированное проектирование колес, калибровок, инструмента деформации и процессов в колесопрокатном производстве : монография / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, Н. И. Ивлева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 348 с.
6. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности: ГОСТ 33783-2016. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 13 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОРРОЗИЙНОСТОЙКИХ БИМЕТАЛЛОВ

Серегин М.С., Скляр В.А.

«Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова» (филиал)
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Одним из уникальных материалов нашего времени являются коррозионностойкие биметаллы, их применение можно заметить в таких важных отраслях промышленности, как машиностроении, судостроении, электронике, строительстве и многих других. Эти материалы, в составе которых, как правило, в качестве основного слоя используется из конструкционной стали, а плакирующий слой из коррозионностойкой, обладают свойствами, которые значительно превосходят характеристики отдельных компонентов [1-3].

Объектом данного исследования является процесс прокатки коррозионностойких биметаллов, а предметом – распределение деформации между основным и плакирующим слоем.

Цель данной работы заключается в определении разности в степенях деформации основного и плакирующего слоя пакета биметалла при прокатке, на основе которой возможно точно определить исходную величину плакирующего слоя для сборки пакета.

Для примера продукции, изготавливаемой из биметалла, было выбрано колонное оборудование. Такое оборудование из биметаллического листа, например, изготавливает ОАО «ВОЛГОГРАДНЕФТЕМАШ». Температура стенки таких колон не превышает +450 °С, поэтому в соответствии с ГОСТ 34347-2017 [4] «Сосуды и аппараты стальные сварные» были выбраны стали 08Х13 в качестве плакирующего слоя и 09Г2С в качестве основного слоя.

В соответствии с ГОСТ 10885—85 [5] «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая» определили, что для толщины коррозионностойкого листа 50 мм (требование предприятия исходя из конструктивных соображений) толщина плакирующего слоя из стали 08Х13 должна составлять 6 мм, а основного из стали 09Г2С соответственно 44 мм.

С помощью справочных данных рассчитали соотношение сопротивлений деформации выбранных сталей при температурах прокатки по типовому режиму обжаты. Соотношение между значениями сопротивления деформации для выбранных сталей составляет $\approx 1,5$.

Поскольку основным параметром, который определяет возникновение неравномерности деформации основного и плакирующего слоев пакета биметалла в ходе прокатки является разница в их сопротивлении деформации, то для моделирования необходимо подобрать материалы, соотношения между сопротивлением деформации которых, будет близко к соотношению сопротивления деформации сталей основного и плакирующего слоев.

С этой целью были проведены исследования прочностных свойств разных

видов пластилина. Изучение прочностных свойств пластилина производилось на прессе настольном ПРГ-1-70. Образцы изготавливались из пластилина марок: «Луч» мягкий белый, «Гамма» мягкий белый, «Гамма» твердый серый, DeVente твердый терракотовый; в виде кубов с размерами 30хх30х30 мм.

Испытания образцов) производили при различной температуре: по 3 образца каждого из видов пластилина были охлаждены, с помощью морозильной камеры, до -18°C , 3 образца охладили до 4°C и оставшиеся 3 образца были оставлены при комнатной температуре, а именно 20°C .

Результаты испытаний представлены на рисунке 1.

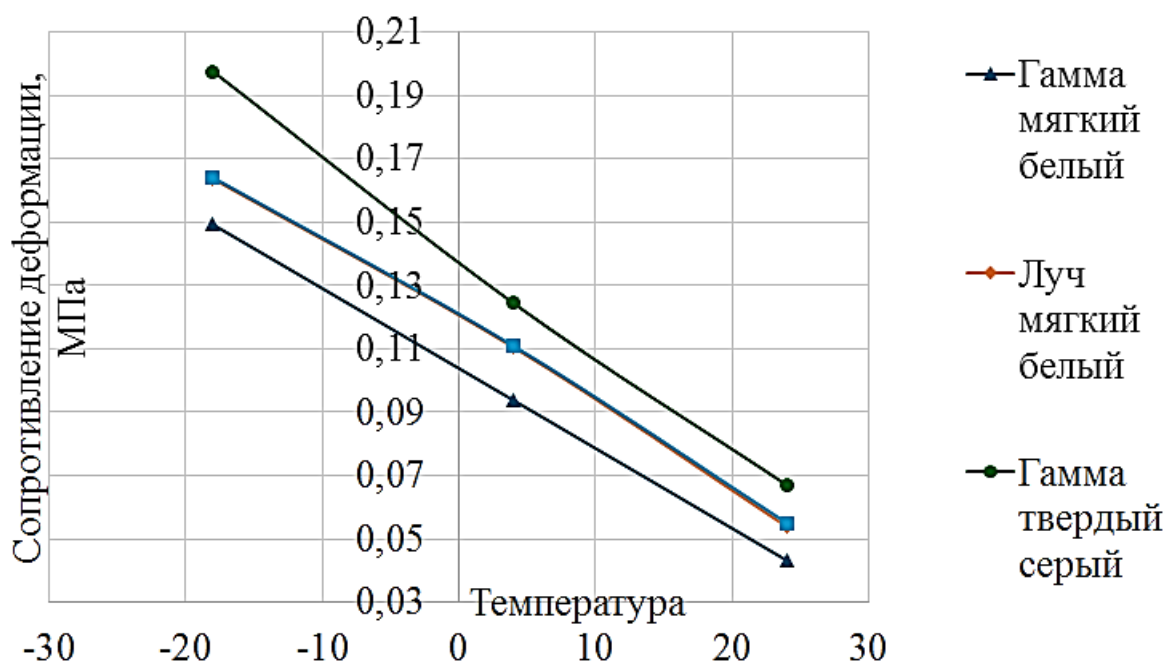


Рисунок 1 - Зависимости сопротивления деформации от температуры разных видов пластилина

Как видим, соотношение сопротивлений деформации образцов «Гамма» мягкий белый» и «Гамма» твердый серый» при температуре -18°C составляет 1,55, что фактически соответствует соотношению сопротивлений деформаций сталей 08Х13 и 09Г2С $1,55 \approx 1,5$. Таким образом данные виды пластилина можно использовать для процесса прокатки биметаллов с соответствующим соотношением сопротивления деформации.

Таким образом образцы в масштабе 1:10 для прокатки изготавливались из двух видов пластилина:

- «Гамма» мягкий белый для основного слоя (толщина 20 мм);
- «Гамма» твердый серый для плакирующего слоя, толщина которого составляла 2,4, 2,7 3,0 и 3,3 мм (рисунок 2).



Рисунок 2 – Образцы до прокатки

Полученные образцы были помещены в морозильную камеру с температурой $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, в которой содержались не менее 24 ч. Охлажденные образцы прокатывались на лабораторном стане 5Л.00.00.00.

При прокатке биметалла относительная деформация по высоте мягкого слоя будет больше относительной деформации твердого слоя и общей относительной деформации заготовки.

Разница в деформации слоев будет тем больше, чем больше различие в величине сопротивления деформации основного и плакирующего металлов.

На рисунке 3 мы можем увидеть, что относительная деформация по высоте основного слоя больше общей относительной деформации и относительной деформации плакирующего слоя, что соответствует известному условию

$$\varepsilon_{\text{осн}} > \varepsilon_{\text{общ}} > \varepsilon_{\text{пл}}$$

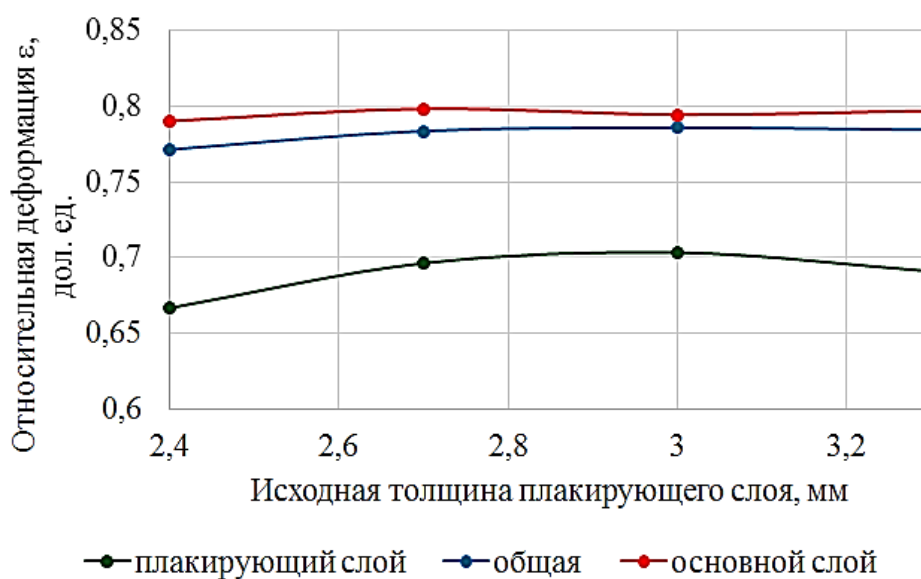


Рисунок 3 – Распределение относительных обжатий по слоям образцов

Расчет длин вытяжек показал, что вытяжка основного слоя больше вытяжки плакирующего слоя примерно на 15%. Так как основной слой мягче плакирующего, он стремится вытянуться быстрее, что видно на рисунке 4.

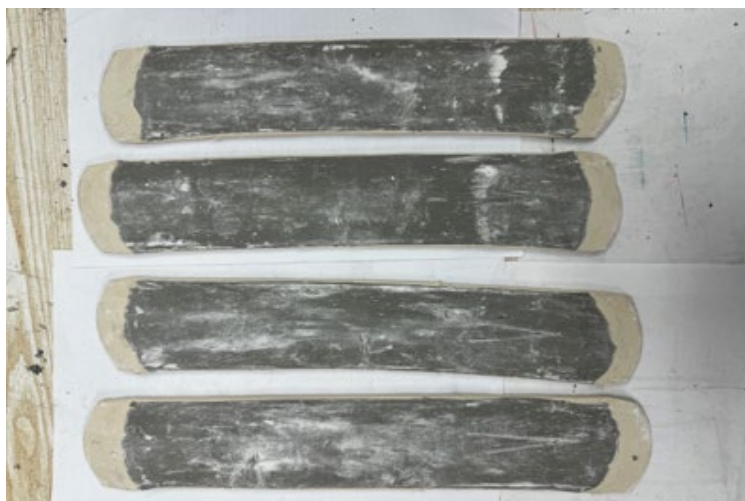


Рисунок 4 – Вид образцов после прокатки

Правильный выбор толщины исходной заготовки плакирующего металла обеспечивает получение заданного соотношения толщин слоев в готовом листе, позволяет установить жесткие допуски на толщину плакирующего слоя. Тем самым не только повышается качество биметалла, но и достигается минимальный расход, как правило, дефицитного и дорогого плакирующего металла.

В настоящее время наиболее распространенным способом расчета толщины исходной заготовки является расчет с помощью эмпирических коэффициентов. Для случаев прокатки биметаллических листов с нержавеющей плакирующим слоем из двухслойных слитков применяют следующее соотношение:

$$H_{пл} = K \frac{\alpha}{100} H, \quad (1)$$

где $H_{пл}$ – толщина исходной заготовки плакирующего металла;

α – заданная толщина плакирующего слоя в готовом листе (% от общей толщины готового листа);

H – суммарная толщина исходной заготовки (двухслойного слитка);

K – опытный коэффициент.

Средний опытный коэффициент, полученный в работе:

$$K = \frac{0,686 + 0,712 + 0,722 + 0,698}{4} = 0,705$$

Имея коэффициент K , пересчитаем исходную толщину плакирующего слоя для получения биметалла с толщиной плакирующего слоя 0,6 мм.

$$H_{пл} = 0,705 \frac{0,6}{5} 22 = 1,8 \text{ мм}$$

Следовательно, для получения металла с толщиной плакирующего слоя 0,6 мм, нам нужно взять исходную толщину заготовки плакирующего твердого слоя равной 1,8 мм. Изготовленный образец с такими параметрами был прокатан по аналогичному режиму, полученная конечная толщина плакирующего слоя в 0,62 мм (при требуемой 0,6 мм) подтвердила наши расчеты.

После получения коэффициента опытным путем и проверки расчета для наших образцов из пластилина, мы можем вернуться к нашим выбранным сталям и рассчитать подходящую толщину листа плакирующего слоя:

$$H_{\text{пл}} = 0,705 \frac{6}{50} (200 + H_{\text{пл}}) \quad (2)$$

Решив уравнение, получим:

$$H_{\text{пл}} = 18,48 \text{ мм}$$

Следовательно, для получения нашего запланированного биметалла из сталей 08Х13 и 09Г2С с толщиной твердого и мягкого слоя равными 6 и 44 мм соответственно, толщина плакирующего слоя заготовки должна быть равна 18,5 мм.

Таким образом, в результате анализа экспериментальных данных была определена величина коэффициента, который учитывает неравномерность деформации слоев биметалла и позволяет вычислять толщину исходного плакирующего слоя ($K = 0,705$). С использованием данного коэффициента была рассчитана толщина плакирующего слоя из стали 08Х13 $H_{\text{пл}} = 18,5$ мм, который будет устанавливаться на сляб из стали 09Г2С толщиной 200 мм. Указанная толщина позволит получить соотношение слоев 6 и 44 мм в листе толщиной 50 мм. Проведенная экспериментальная прокатка на пластилиновом образце в масштабе 1:10 с толщиной плакирующего слоя 1,8 мм подтвердила правильность наших выводов.

Литература:

1. Коновалов Ю. В. Производство биметаллов / Ю. В. Коновалов, В. М. Клименко. – М.: Металлургия, 1986. – 240 с.
2. Голованенко С. А., Меандров Л.В. Производство биметаллов / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. - М., Металлургия, 1966. - 148 с.
3. Скляр В.А. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии / В.А. Скляр. - Донецк.: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
4. ГОСТ 34347—2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические условия: введ. впервые: дата введения 30-11-2017. — Москва: Стандартинформ, 2018. — 110 с.
5. ГОСТ 10885–85. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия: введ. впервые: дата введения 01-07-1986. — Москва: Изд-во стандартов, 2002. — 16 с.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОКАТКИ

Чумак Н.Ю., Яковченко А.В.

Донбасский государственный технический университет

Потребность в горячекатаных профилях для крепи горных выработок составляет сотни тысяч тонн в год. Поэтому обоснование параметров профилей для крепи горных выработок и совершенствование технологии их прокатки являются актуальными задачами.

Известные профили СВП [1] (рис.1а) и СПА [2] (рис.1б) характеризуются рациональным распределением металла по их сечениям и, соответственно, наиболее высокими статическими показателями. Они отвечают основным требованиям, предъявляемым конструкционному материалу для крепи горных выработок, и превосходят по ним известные отечественные и зарубежные аналоги. Этим обоснован их выбор для выполнения исследований.

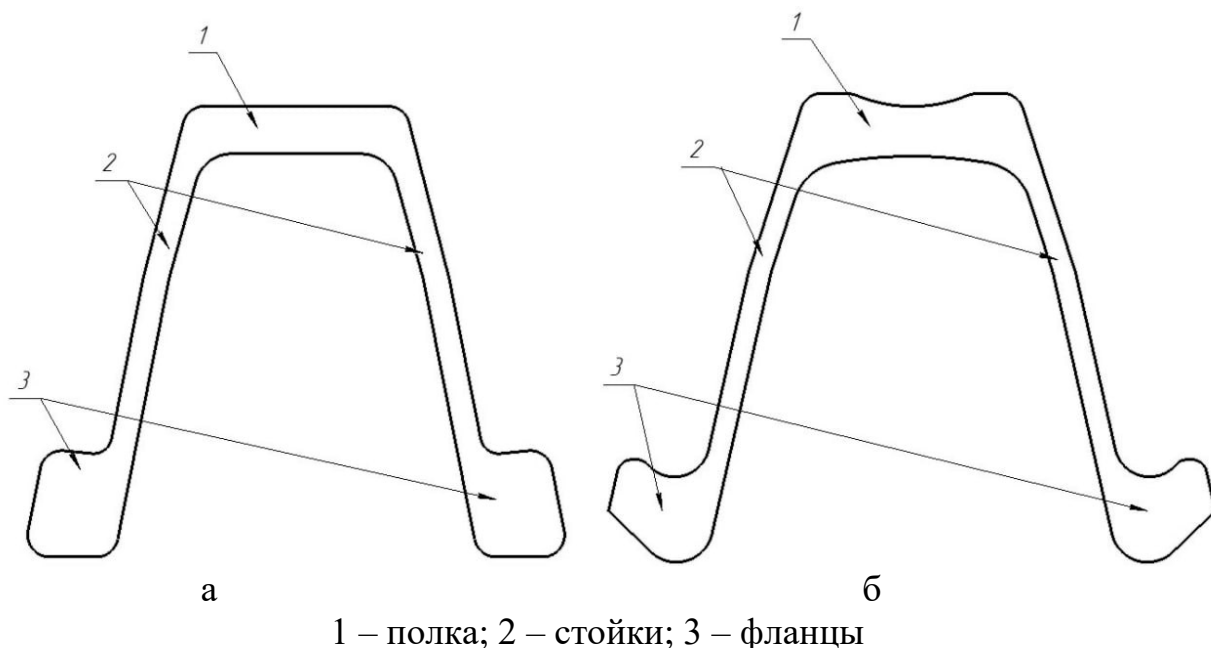


Рисунок 1 – Профили для крепи горных выработок: а - СВП [1]; б - СПА [2]

Горячекатаный профиль СВП, предназначенный для крепления горных выработок, характеризуется наличием полки постоянной толщины. К полке симметрично присоединены наклонные боковые стойки с опорными фланцами на концах. Верхняя и нижняя поверхности опорных фланцев выполнены плоскими.

Разработанный и освоенный в 1950-е годы, профиль СВП до сих пор широко используется в горном деле.

Горячекатаный профиль СПА, предназначенный для крепления горных

выработок, характеризуется конструкцией с переменной толщиной полки, к которой симметрично присоединены наклонные боковые стойки. Эти стойки оснащены опорными фланцами на концах, верхняя и нижняя поверхности которых выполнены под острым углом к горизонтали.

Разработка и освоение профиля СПА начались в начале XXI века с целью повышения статических характеристик. Это достигается за счет перераспределения массы в поперечном сечении профиля и возможности принудительного зацепления по фланцам специальных профилей при их соединении.

Профили для крепи горных выработок, как правило в основном прокатывают из конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 (нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа).

Арочные крепи для капитальных и подготовительных выработок шахт испытывают значительные нагрузки горного давления. Поэтому к спецпрофилям для них, которые работают на сжатие и изгиб, предъявляются требования высокой прочности и устойчивости сечения. Для обеспечения этих требований целесообразно применение сталей высокой прочности.

Известно, что изготовление арочной крепи из профилей, прокатанных из конструкционной легированной стали 14Х2ГМР (высокой прочности с пределом текучести до 700 МПа), позволило существенно повысить их несущую способность. Однако поиск более экономичных альтернатив этой стали с сохранением высоких прочностных характеристик остается актуальной задачей. [3].

Для решения данной задачи, а также повышения несущей способности крепи горных выработок необходимо обосновать для горячекатаных профилей СВП и СПА замену конструкционной углеродистой стали Ст5 на конструкционную низколегированную сталь высокой прочности с пределом текучести не менее 450 МПа.

Поэтому требуется выполнение конечно-элементного моделирования процессов нагружения профилей для крепи горных выработок СВП и СПА из указанных сталей, работающих на сжатие и изгиб, с целью исследования их прочности и устойчивости.

Актуальна оценка напряженно-деформированного состояния элементов профилей СВП и СПА от действия эксплуатационных нагрузок. Схемы нагружения должны моделировать различные эксплуатационные ситуации и соответственно нагрузки, которые имеют место на практике.

Напряженное состояние элементов профилей необходимо сравнивать как по абсолютным значениям напряжений, так и по склонности элементов профилей к концентрации наибольших напряжений в одних и тех же зонах при различных вариантах нагружения.

Также необходимо выполнить конечно-элементное моделирование процессов прокатки профилей для крепи горных выработок СВП и СПА по способу [4], позволяющему совместить в фасонных проходах высотную деформацию их элементов с интенсивным растяжением боковых наклонных

стенок. Способ может обеспечить высокую технологичность на сортовых прокатных станах.

Для совершенствования технологии прокатки на базе этого способа необходимо получение расширенных представлений о механизме процесса высотной деформации элементов профилей с интенсивным растяжением боковых наклонных стенок.

В итоге поставлена задача выбора для профилей крепи горных выработок СВП и СПА конструкционной низколегированной стали высокой прочности, имеющей предел текучести не менее 450 МПа.

Также поставлена задача разработки базы цифровой информации о напряжении течения стали при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с⁻¹ и температуры в диапазоне 900-1200 °С.

Указанная база необходима для успешной реализации конечно-элементного моделирования в системе DEFORM 3D различных вариантов технологий прокатки на стане 600.

В заключение необходимо отметить, что профили СВП и СПА рационально получать прокаткой из конструкционной низколегированной стали высокой прочности, имеющей предел текучести не менее 450 МПа, которая будет более дешевой по сравнению с конструкционными легированными сталями типа 14Х2ГМР, 14ХГН.

При этом также целесообразно выбрать сталь, у которой напряжение течения металла при горячей пластической деформации будет соответствовать кривым течения стали 14ХГН, для которой в работе [5] по указанным кривым имеется экспериментальная информация.

Литература:

1. ГОСТ 18662-2023. Профили горячекатаные специальные взаимозаменяемые (СВП) для крепи горных выработок. Сортамент. – Введ. 2023-08-01. – Москва: Российский институт стандартизации, 2023. – 7 с.
2. Луцкий М. Б., Кириченко В. Я., Луценко В. А., Козлов К.М. Новый профиль для крепления горных выработок. Proceedings of the school of underground mining 2002. International mining forum, Szczyrk, 18-22 February 2002- Cracow, 2002. - P363-368.
3. Жербин М.М. Высокопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование). Киев, «Будівельник», 1974, стр. 160.
4. Луцкий М. Б., Дорожко И. К., Луценко В. А., Чичкан А. А., Лигус Н.Н. Новый способ прокатки специальных взаимозаменяемых профилей. Сб. науч. тр ДонГТУ. - Алчевск. -2004г.-Вып.18. - с.231-235.
5. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – Москва : Металлургия, 1983. – 352 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Боднарюк С., Штыхно А.П.

Донецкий национальный технический университет

Повышение работоспособности изделий из конструкционных сталей остаётся одной из ключевых задач в машиностроении и смежных отраслях. Для её решения широко применяются различные методы упрочнения, позволяющие значительно улучшить эксплуатационные характеристики материалов. Одним из таких эффективных подходов является поверхностное упрочнение с применением наплавки и низкотемпературной плазмы. Эти методы используются как для восстановления изношенных деталей, так и для создания новых изделий с повышенной твёрдостью, износостойкостью и жаропрочностью. Однако процессы наплавки и плазменной обработки могут вызывать остаточные напряжения, деформации и дефекты, такие как пористость и неоднородность структуры. Поэтому изучение структуры и свойств изделий из конструкционных сталей для повышения их работоспособности является важным направлением исследований.

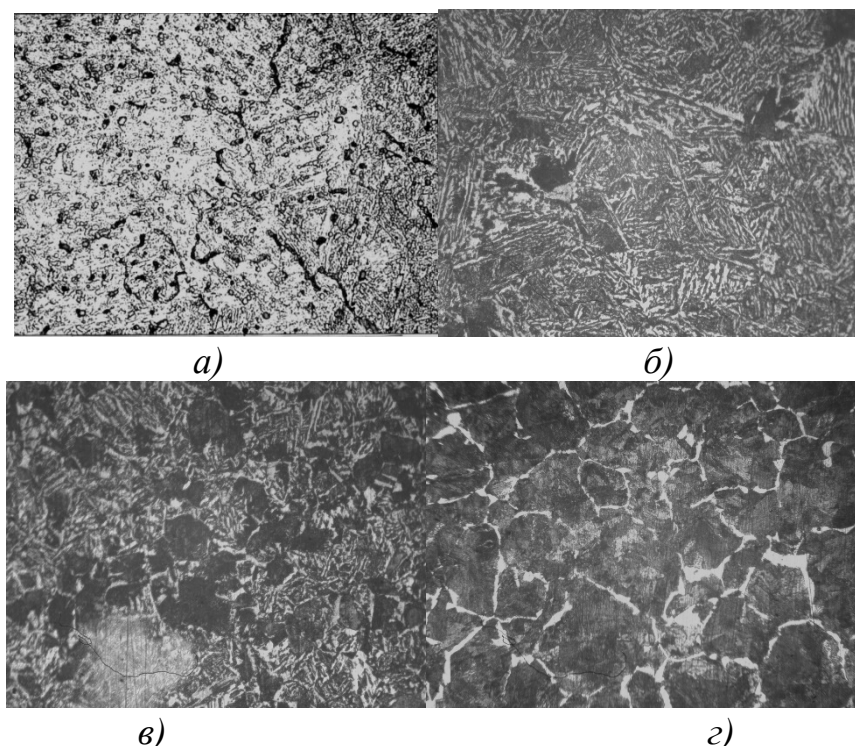
Исследования проводились на образцах из конструкционных сталей 20, 40 с упрочнением плазменной струей на установке «Мультиплаз3500» и 40Х после наплавки порошковой проволокой с содержанием около 15% Сг.

Для изучения микроструктуры всех сталей после поверхностной обработки изготавливали микрошлифы по общепринятой технологии, травление производили в 4%-м растворе азотной кислоты в спирте. Далее изучались микроструктуры по сечению наплавленного и основного металла, глубина наплавленного и упрочненного слоя, твердость и микротвердость. По результатам измерений построили графики распределения твердости. График распределения твердости по сечению образца из стали 40Х после наплавки представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – График распределения твердости по сечению образца из стали 40Х после наплавки

Изучение микроструктуры по сечению образцов подтвердили, что структура очень сильно изменяется: от мартенсито-карбидной в наплавленном слое, далее мартенсито-трооститной до феррито-перлитной в основном металле. Все микроструктуры после наплавки приведены на рисунке 2



а) наплавленный слой с содержанием около 15% Cr ; б) переходный слой; в) переходный слой; г) основного металла на расстоянии 15 мм от поверхности.

Рисунок 2 – Микроструктуры образцов стали 40Х после наплавки, х500

Из рисунка 2 видно, что глубина наплавленного слоя имеет максимальную твердость 43-45 HRC и составляет около 3 мм. Далее твердость снижается, но не монотонно, что объясняется перегревом металла в зоне сплавления, далее прочность снова повышается и на глубине 12-15 мм значение твердости стабилизируются.

Такие свойства позволяют повысить износостойкость изделий в условиях абразивно-коррозионного износа и продлить его работоспособность, но после наплавки в поверхностном слое остаются внутренние напряжения, которые могут способствовать разрушению наплавленного слоя за счет получения неравновесной упрочненной структуры.

Поэтому необходимо провести низкий отпуск для снятия внутренних остаточных напряжений, возникающих при наплавке. Свойства основного и наплавленного металла при этом удовлетворяют требованиям к деталям, которые работают в абразивно-коррозионной среде.

Плазменное поверхностное упрочнение металлов основано на способности плазменной дуги создавать на небольшом участке поверхности высокую плотность теплового потока, достаточную для нагрева и плавления

практически любого металла [1]. Особое внимание уделяется применению низкотемпературной плазмы для термического упрочнения и восстановления геометрических размеров изношенных поверхностей. Плазменная обработка позволяет локально изменить структуру поверхностного слоя изделия, улучшая его физико-механические свойства при минимальном термическом влиянии на основной материал. Этот метод считается одним из наиболее перспективных для поверхностной обработки металлических изделий.

На рисунке 3 представлена микроструктура сечения образца из стали 40, подвергнутого упрочнению низкотемпературной плазменной закалке со скоростью движения зоны нагрева 1 мм/с. На рисунке явно видно 3 зоны: упрочненная зона (зона А), зона термического влияния (зона Б) и сердцевина образца (зона В). Дугообразная форма зон А и Б соответствует проводящему теплообмену энергии вглубь образца.

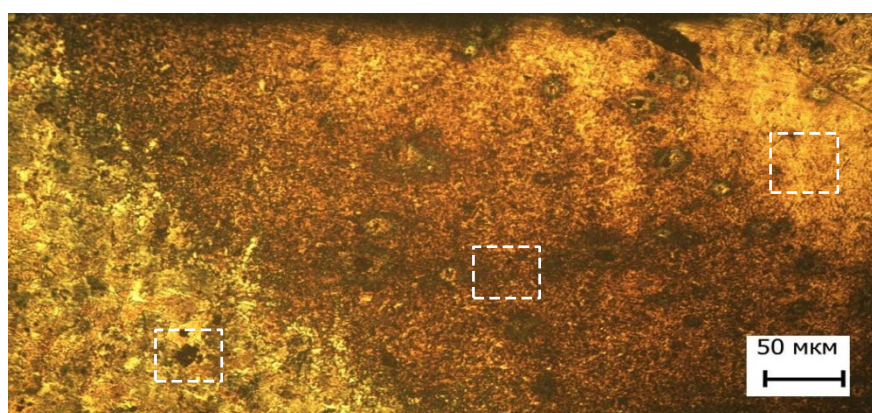
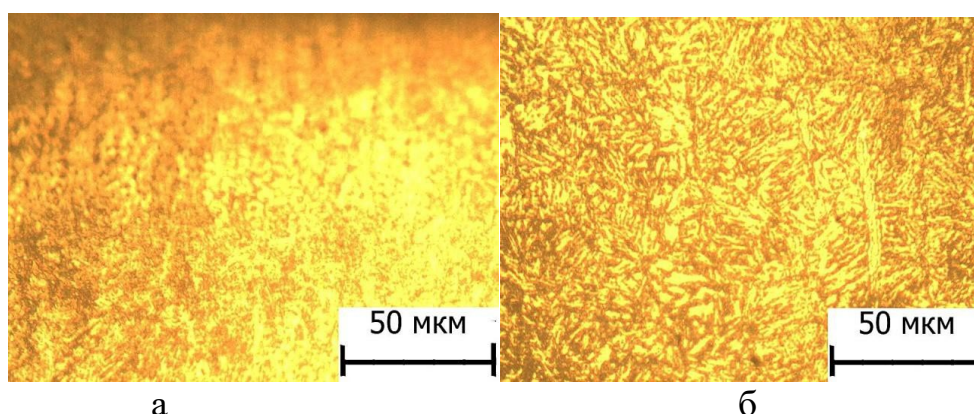


Рисунок 3 – Микроструктура поперечного сечения зоны плазменного упрочнения стали 40, x100

Микроструктура закаленной зоны стали 40 (зона А) при большем увеличении показана на рисунке 4, а.



а - зона А;
б - зона Б;

Рисунок 4 – Микроструктура стали 40 после плазменной закалки, x400

Из рисунка 4 видно, что зона А состоит в основном из среднеигльчатого

мартенсита. Отсутствие существенных вариаций дисперсности мартенситной структуры в этой зоне свидетельствует о тенденции к гомогенизации аустенита при более высоких температурах нагрева поверхностных слоев обрабатываемой стали.

Микроструктура зоны Б (рисунке 4, б) состоит в основном из мелкоигольчатого мартенсита, который образовался при быстром нагреве стали 40 и последующем охлаждении со сверхкритической скоростью, за счет отвода тепла вглубь металла. Такая структура может способствовать повышению механических свойств за счет увеличения микротвердости до 7800 Н/мм², что подтверждается данными на рисунке 5.

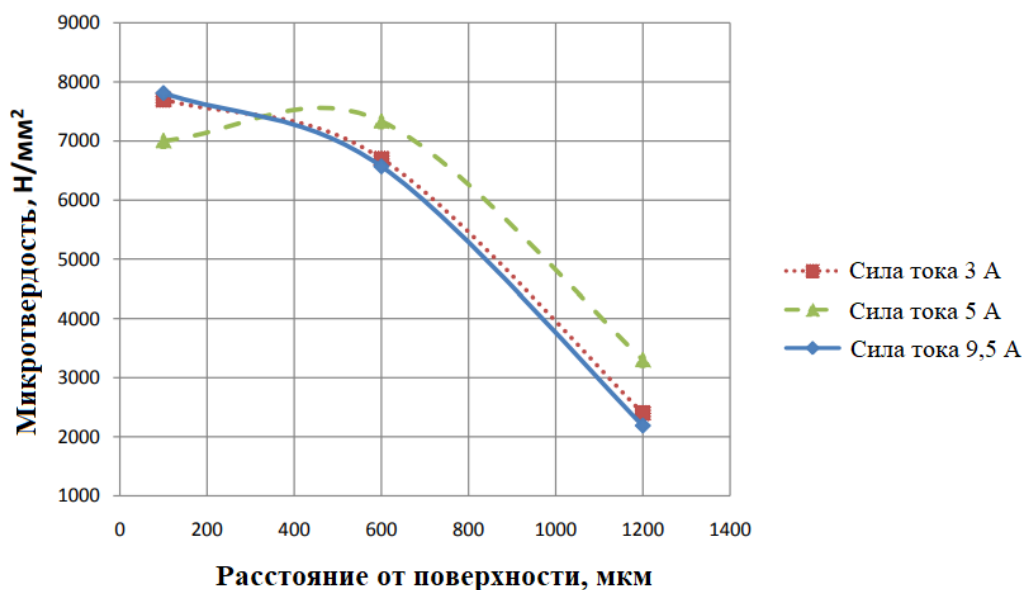


Рисунок 5 – Изменение микротвердости по сечению образцов из стали 40 в зависимости от величины силы тока при обработке плазменной дугой

Как видно из рисунка 5, повышенная микротвердость наблюдается только на глубину до 600 мкм, далее эти значения снижаются и практически эта зависимость видна при всех параметрах силы тока. Это свидетельствует о том, что упрочнение произошло только на глубину до 0,6 мм.

Таким образом, исследования показали, что износостойкость и работоспособность изделий можно существенно повысить за счет поверхностного локального упрочнения конструкционных сталей наплавкой либо обработкой низкотемпературной плазмой, которые способствуют повышению твердости поверхностного слоя для всех сталей. Такие виды обработки можно также использовать для восстановления изношенных деталей.

Литература:

1. Лещинский, Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ 10Г2С1

Голубев Д.И., Егоров Н.Т.

Донецкий национальный технический университет

Нормализация является наиболее распространенным видом термической обработки толстых листов из низколегированных сталей и осуществляется, как правило, при их нагреве до температур 900-950°C. По сравнению с горячекатаным состоянием нормализация незначительно снижает или практически не изменяет прочностные характеристики толстолистовых сталей, повышая при этом их пластические и вязкие свойства.

Информация о влиянии нормализации с нагревом стали в межкритический интервал температур, т.е. ниже точки A_{c3} , весьма ограничена и противоречива [1, 2]. Одни авторы утверждают, что такая обработка не пригодна для низколегированных сталей из-за их охрупчивания, другие, наоборот, рекомендуют ее для повышения характеристик хладостойкости. Специальных исследований по изучению влияния нормализации при повышенных температурах на структуру и свойства толстолистовых сталей в технологической литературе нами не обнаружено.

В работе изучали структуру и механические свойства стали 10Г2С1 (0,14% С; 0,56% Мн; 1,12% Si; 0,024% S; 0,018% Р) после ее нормализации с нагревом до температур 800-1100°C.

Карточки размером 14×100×200 мм вырезали из горячекатаных листов текущего производства Алчевского металлургического комбината и подвергали их нагреву в интервале 800-1100°C через каждые 50°C с выдержкой 30 мин, после чего охлаждали на воздухе.

Микроструктуру стали исследовали на световом микроскопе «Neophot-21». Механические свойства после различных режимов нормализации определяли при испытании цилиндрических образцов по ГОСТ-1497. Испытания на ударный изгиб проводили на образцах типа I (ГОСТ-9454) при температурах от плюс 20°C до минус 70°C и после механического старения.

В исходном горячекатаном состоянии микроструктура стали состоит из феррита и плотного сорбитообразного перлита, занимающего около 30% площади по шкале 7 ГОСТ-8233. Величина зерна феррита соответствует 6-7 баллу по ГОСТ-5639.

После нормализации от температур 800 и 850°C структура стали состоит из феррита и продуктов промежуточного распада аустенита. Участки промежуточной структуры располагаются в виде цепочки отдельных зерен вокруг α -фазы, а с повышением температуры приобретают вид преимущественно игольчатых выделений. По мере приближения к верхней критической точке A_{c3} количество участков промежуточной структуры уменьшается и в структуре стали появляется перлит и перлитно-бейнитные

комплексы. При нагреве до температур 900-1000°C структура стали состоит, в основном, из феррита и перлита. В ряде случаев на фоне мелкозернистой феррито-перлитной структуры наблюдаются отдельные крупные зерна, наружная часть которых состоит из перлита, а в центральной части содержатся продукты промежуточного распада аустенита бейнитного типа (рисунок 1).

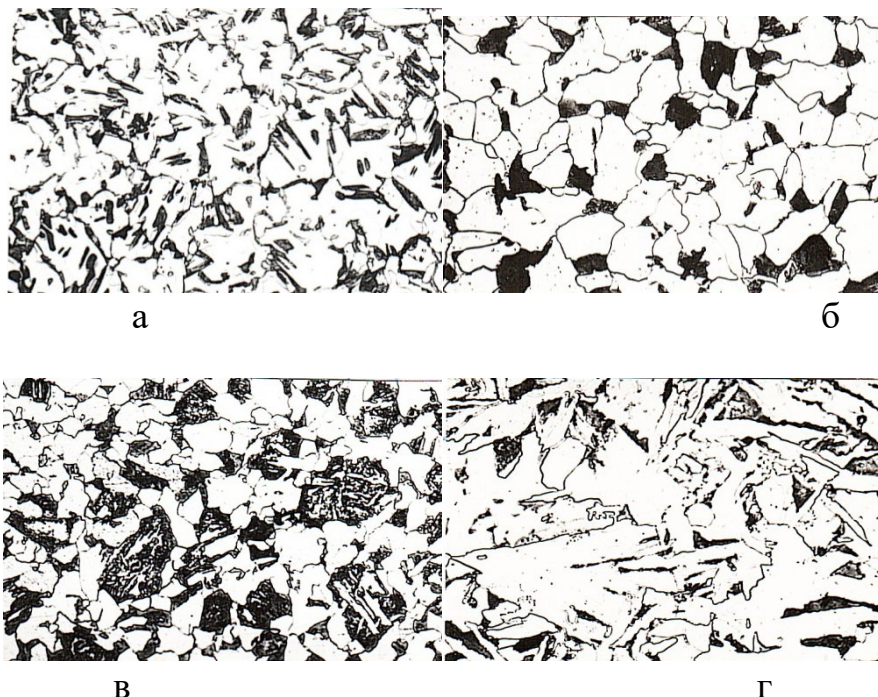


Рисунок 1 – Микроструктура стали 10Г2С1 после нормализации с нагревом до температур: а - 800°C, б - 900°C, в - 1000°C, г - 1100°C, х400

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наиболее значительные изменения в структуре стали происходят после нормализации от температур 800-900°C, т.е. ниже критической точки A_{c3} . Эти изменения являются следствием перераспределения марганца и кремния между аустенитом и ферритом при нагреве стали в интервале A_{c1} - A_{c3} . Исследования [3] с помощью рентгеновского микроанализатора MAP-1 показали, что феррит стали 10Г2С1 после нагрева на 800°C и охлаждения на воздухе содержит почти в два раза больше кремния, чем участки промежуточной структуры, образующиеся из аустенита, которые в свою очередь обогащены марганцем.

На рисунке 2 приведены механические свойства стали 10Г2С1 после различных режимов нормализации.

Из представленных данных видно, что с повышением температуры нормализации в интервале 800-1100°C временное сопротивление разрыву (σ_B) снижается, а предел текучести (σ_T) практически не изменяется. Относительное удлинение и ударная вязкость, в основном, повышаются, однако в интервале 950-1000°C наблюдается заметное снижение этих характеристик. Характер изменения ударной вязкости при температурах испытания от плюс 20°C до минус 70°C в зависимости от температуры нормализации аналогичен.

Определенной зависимости склонности стали к механическому старению от температуры нормализации не наблюдается.

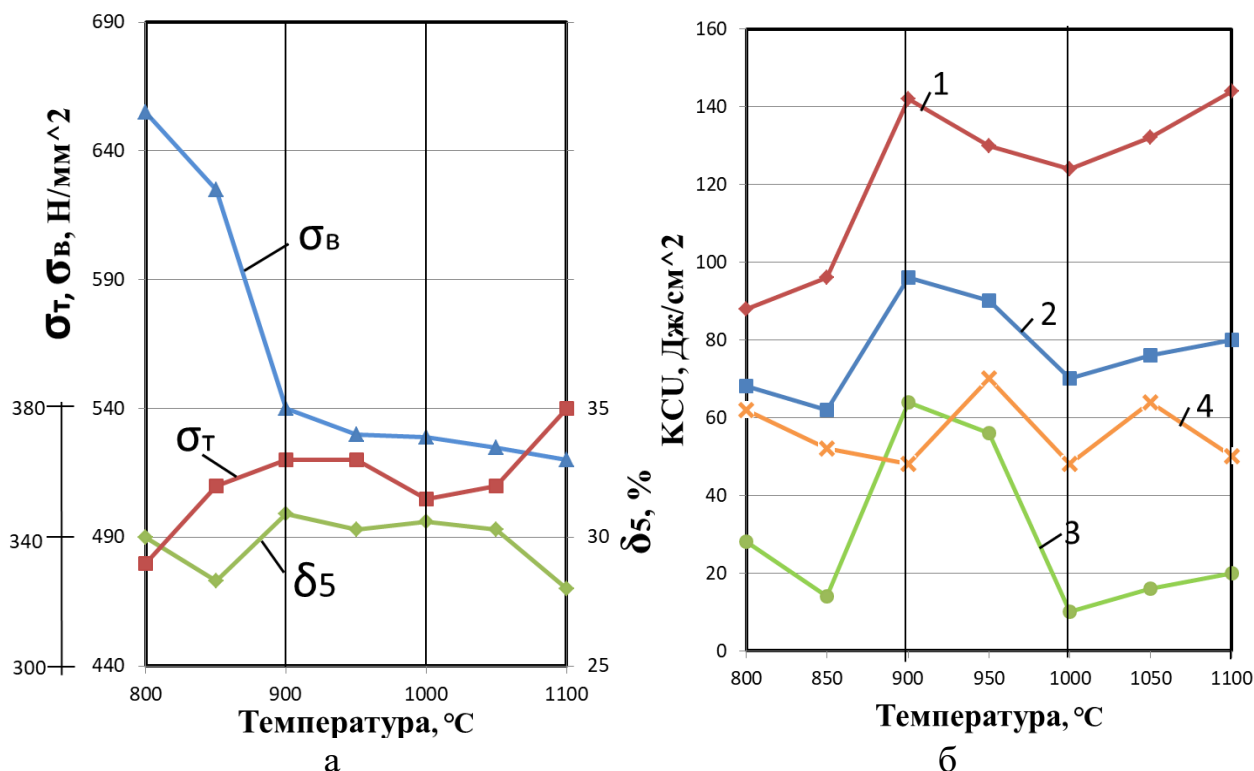


Рисунок 2 – Влияние температуры нормализации на механические свойства (а) и ударную вязкость (б) стали 10Г2С1 при температурах испытания: 1 – плюс 20°С, 2 – минус 40°С, 3 – минус 70°С, 4 – механическое старение.

В целом уровень механических свойств стали 10Г2С1 с нагревом в интервале 800-1100°С по всем показателям, кроме ударной вязкости при температуре минус 70°С, удовлетворяет требованиям ГОСТ-19282 и ГОСТ-5520. После нормализации при 900-950°С механические свойства стали полностью соответствуют всем требованиям соответствующих стандартов.

Литература:

1. Мизонов, В. М. Влияние температуры нормализации на хладноломкость и механические свойства стали 09Г2С / В. М. Мизонов, Т. А. Константинова, А. П. Сухомлина и др. // Сталь. – 1968. - №11. – С. 1032-1034
2. Дьяченко, С. С. Особенности структур неполной перекристаллизации и их влияние на свойства сталей / С. С. Дьяченко, О. П. Фомина // Металловедение и термическая обработка. - 1970 - №11. – С. 9-13.
3. Подгайский, М. С. Исследование особенностей микроструктуры кремнемарганцевой стали после нагрева в межкритический интервал температур / М. С. Подгайский, Г. Д. Уманская // Производство листа. - М.: Металлургия, 1973, №2. – С. 70-73.

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВА КОЛОСНИКА ЩЕЛЕВЫХ СИТ

Гуляев А., Крымов В.Н.

Донецкий национальный технический университет

Щелевые (шпальтовые) сита широко применяются в горной, целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности в процессах обогащения, обезвоживания, отсева и т.п. Сита изготавливаются, в основном, с помощью сварки из колосников – проволоки специального профиля (рис. 1).



Рисунок 1 – Образец щелевого сита

Условия эксплуатации сит, как правило, подразумевают наличие коррозионной среды и изнашивающее воздействие. Поэтому основным материалом для изготовления колосников являются нержавеющие стали. Чаще всего, это стали аустенитного класса типа 18-10. Обладая отличной коррозионной стойкостью и хорошей технологичностью аустенитные стали не имеют высокой износостойкости. Поэтому сита иногда пытаются подвергать поверхностному упрочнению путем нанесения различных покрытий.

Одним из решений является изготовление колосников из нержавеющих сталей мартенситного класса с последующей закалкой. Наиболее подходят для этих целей стали типа X13. На некоторых заводах* проводились промышленные эксперименты, которые показали хорошие результаты. Колосники удовлетворительно сваривались, а после закалки приобретали твердость HRC 45-50. Термообработывали во всех случаях карты сит – заготовки, представляющие собой сваренное из колосников полотно с максимальными размерами до 2 м. Хотя охлаждение с закалочного нагрева производилось на воздухе, карты коробились.

Учитывая то, что колосник является проволокой, логичным выглядит предложение осуществлять закалку с непосредственным электронагревом. Это решение имеет следующие преимущества [1, 2]:

- высокий КПД, поскольку тепло выделяется непосредственно внутри нагреваемого изделия;
- высокая скорость нагрева, что позволяет снизить окисление и

* Работа выполнялась на базе завода универсального машиностроения ООО «Техносоюз»

обезуглероживание;

- повышение производительности по сравнению с печным нагревом.

Установки для непосредственного электронагрева давно применяют в промышленности при термической обработке труб, проволоки, прутка и т.п. Как правило, обрабатываемое изделие нагревается в этих установках в горизонтальном положении [3]. Это требует учета удлинения изделий при его термическом расширении. По этой причине, разрабатывая конструкцию приспособления для заковки колосника была предусмотрена возможность поворота приспособления в вертикальной плоскости.

Объемный эскиз представлен на рис. 2.

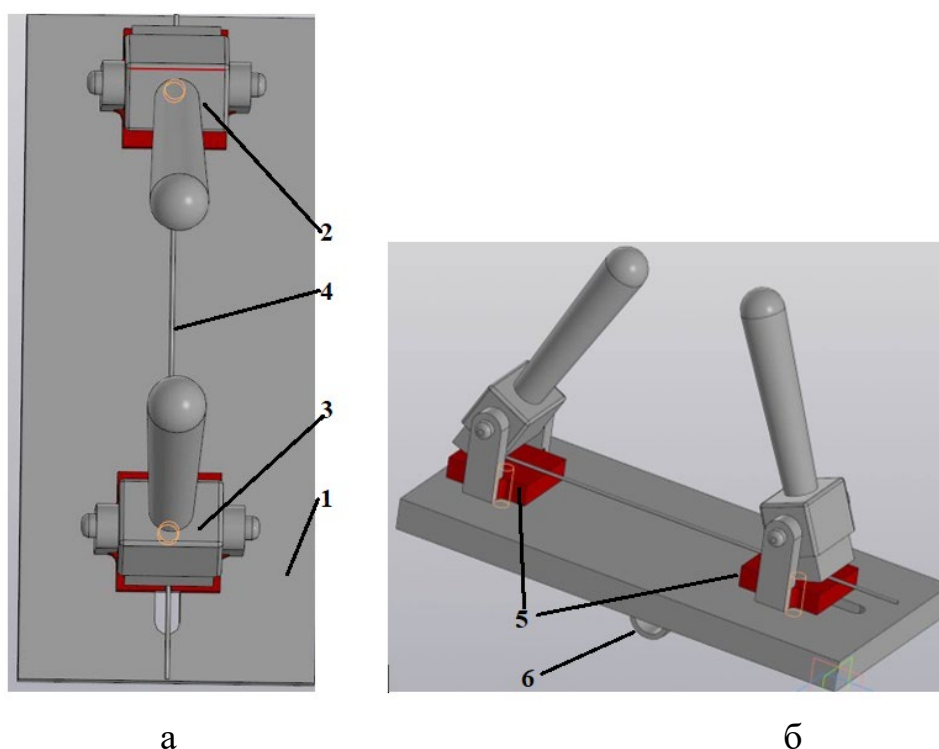


Рисунок 2 – Эскиз приспособления для непосредственного нагрева

Приспособление собирается на плите (1), изготавливаемой из диэлектрического материала, стойкого к нагреву. Это, например, текстолит или асбоцемент. На плите закрепляется два медных контакта (5). К контактам снизу подводятся гибкие шины (не показаны).

Нижний контакт может свободно перемещаться вдоль паза. Это позволяет компенсировать удлинение колосника при нагреве. На медные контакты на кронштейнах смонтированы зажимы (2 и 3). Зажимы снабжены рукоятками. Причем в верхнем зажиме рукоятка легче, чем сам зажим, а в нижнем наоборот. Зажимная поверхность выполнена со скосами, таким образом, чтобы при повороте под действием силы тяжести зажимы заклинивало. Причем, чем сильнее натяжение колосника, тем сильнее заклинивание зажимов.

На обратной стороне плиты расположена втулка для оси (6), вокруг которой плита поворачивается на 90° с помощью рычага (не показаны). Это

сделано для удобства использования. Длина колосника может превышать 2000 мм, что определяется проектными размерами сита.

Приспособление работает следующим образом. Плита переводится в горизонтальное положение. Нагреваемый колосник (4) зажимается в верхнем, а затем в нижнем зажиме. Затем плита переводится в вертикальное положение. При этом нижний контакт с зажимом скользит вниз под действием силы тяжести, натягивая колосник.

После подачи тока колосник нагревается до заданной температуры, что может контролироваться автоматикой как по длительности нагрева, так и при непрерывном контроле температуры с помощью тарированного пирометра. После достижения температуры закалки ток отключается и происходит охлаждение и закалка колосника. Для ускорения охлаждения может быть использован вентилятор.

После этого колосник извлекается из захватов. Время закалки одного колосника составляет 3-5 минут.

Экспериментальную проверку закалки с непосредственным электронагревом выполняли на образце колосника длиной 1 м. Концы образца закрепляли в сварочные зажимы, которые были подключены к сварочному выпрямителю. Один из зажимов закрепляли в тиски, второй свободно зажимался на нижнем конце колосника. Ток составлял 220 А, длительность нагрева – 15-17 с. После нагрева, температуру которого контролировали с помощью пирометра, ток отключали. Охлаждение происходило на свободном воздухе.

Поскольку по разрабатываемой технологии сборки сит отпуск должен выполняться только после сборки карт, то колосник низкому отпуску не подвергали.

Твердость колосника после закалки составила HRC 48-50. Структура представлена мартенситом.

Как показали опыты на производстве, проведение отпуска после сборки карты из закаленных колосников не приводит к появлению трещин.

Таким образом, закалка с непосредственным нагревом колосника из стали 20Х13 может послужить альтернативой закалке с печным нагревом.

Литература:

1. Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов / Г. С. Коврев. - Москва : Металлургия, 1975. - 311с.
2. Тельнов Г.М. Электронагрев методом сопротивления / Г. М. Тельнов и Е. И. Натанзон. - Москва : Машгиз, 1951. - 185 с.
3. Соколов, К.Н. Оборудование термических цехов / К.Н. Соколов. - Киев: Вища Школа, 1984. - 328 с.

ОЦЕНКА СОВМЕЩНОГО ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ ДОЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ

Каркошко В.С., Горбатенко В.П.

Донецкий национальный технический университет

Положение критических точек сталей зависит прежде всего от их химического состава. При этом следует учитывать то, что наиболее широко используемые для легирования стали элементы могут действовать на положение критических точек противоположным образом [1]. Так, такие легирующие элементы, как никель, марганец, кобальт, медь, расширяют область существования γ -фазы, вызывая снижение критических точек A_3 и A_1 . К элементам, расширяющим область существования γ -фазы, относится и углерод. А такие элементы, как хром, алюминий, кремний, вольфрам, молибден, ванадий, наоборот, расширяют область существования α -фазы, тем самым способствуя повышению критических точек A_3 и A_1 .

Следует, однако, учитывать, что самый популярный легирующий элемент в сталях – хром – в зависимости от его содержания в стали может неоднозначно влиять на положение критической точки A_3 : эта точка вначале снижается с увеличением концентрации хрома до определенного уровня и лишь при дальнейшем росте его содержания фиксируется ее значительное повышение. Подобным образом при небольшой их концентрации могут влиять и такие легирующие элементы, как алюминий, титан, молибден.

Положение критической точки A_1 определяется не только характером влияния легирующих элементов на полиморфизм железа, но и их влиянием на термодинамическую активность углерода в твердом растворе. Некарбидообразующие элементы (никель, кобальт, марганец), повышая термодинамическую активность углерода в аустените, должны тормозить растворение эвтектических карбидов при нагреве и ускорять их выделение в процессе эвтектоидного превращения при охлаждении. Карбидообразующие элементы (хром, вольфрам, молибден, титан, ванадий) снижают термодинамическую активность углерода в твердом растворе, поэтому могут ускорять растворение карбидов эвтектоида при нагреве и тормозить их выделение при эвтектоидном превращении. Это может способствовать снижению критической точки A_1 . Комплексное влияние двух факторов, оказывающих противоположное действие на положение критической точки A_1 , будет определять сложный характер влияния каждого из компонентов состава на ее положение.

Однако реальные температуры критических точек A_3 и A_1 для конкретных сталей будут отличаться от тех, которые можно было бы ожидать, исходя из описанных выше тенденций влияния каждого отдельного компонента состава. Это связано с тем, что большинство легированных доэвтектоидных сталей содержат в своем составе несколько элементов, зачастую отличающихся по

характеру и степени влияния на положение критических точек.

Поэтому целью данной работы является анализ особенностей совместного влияния компонентов состава углеродистых и легированных доэвтектоидных сталей на положение критических точек A_1 , A_3 и Mn .

Для анализа использовали приведенные в работе [2] математические модели регрессионного типа, полученные при обработке данных о критических точках A_1 , A_3 и Mn для 172 марок сталей, приведенных в справочной литературе [3]. Для разработки моделей использовали данные для углеродистых, низколегированных и среднелегированных конструкционных сталей (преимущественно для улучшаемых сталей), максимальное содержание соответствующих компонентов в которых составляло: C – 0,60 %, Mn – 2,06 %, Si – 2,46 %, Cr – 3,52 %, Ni – 5,00 %, Mo – 5,44 %, W – 1,35 %, V – 0,82 %.

Полученные модели имеют вид:

$$K = A_0 + \sum(A_i \cdot X_i),$$

где: K – соответствующая критическая точка (A_1 , A_2 или Mn),

A_i – коэффициент уравнения множественной регрессии для соответствующего химического элемента состава X_i , содержание которого подставляется в процентах.

В таблице 1 приведены соответствующие коэффициенты уравнений, характеризующие влияние каждого компонента на критические точки сталей.

Таблица 1 – Значения коэффициентов, характеризующих степень влияния компонентов состава на температуры критических точек A_3 , A_1 и Mn

Критическая точка	Значения коэффициентов влияния для элементов							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
A_1	-14,60	-16,16	+26,42	+14,52	-14,73	+2,32	+30,52	+38,29
A_3	-202,37	-10,16	+38,83	+0,10	-15,02	+11,01	+1,76	+85,57
Mn	-382,24	-27,38	-10,98	-13,60	-18,12	-14,00	-28,92	+8,30

Примечание: знак «+» означает повышение, а знак «-» - снижение соответствующей температуры.

Полученные математические модели характеризуются достаточно высокими статистическими характеристиками (табл. 2).

Таблица 2 – Статистические характеристики математических моделей

Критическая точка	R	R^2	F (8,164)	ε , °C
A_1	0,863	0,745	59,78	13
A_3	0,888	0,788	76,37	16
Mn	0,911	0,829	99,70	18

Полученные зависимости являются адекватными и обеспечивают достаточно высокую точность результатов при расчетах [2]. Большинство членов полученных уравнений являются значимыми (значения p менее 0,05). Однако в приведенных зависимостях присутствуют отдельные члены уравнений с незначимыми коэффициентами для некоторых компонентов состава ($p \geq 0,05$). Для критической точки A_1 такими компонентами состава являлись углерод и молибден. Для критической точки A_3 незначимыми были коэффициенты уравнения для хрома и вольфрама. Для критической точки начала мартенситного превращения M_n незначимым был только коэффициент уравнения для ванадия.

Полученные уравнения не противоречат известным представлениям о том, что элементы, расширяющие γ -область (углерод, марганец, никель) способствуют снижению критических точек A_1 и A_3 , а элементы, расширяющие α -область и, соответственно, сужающие γ -область, наоборот, будут эти критические точки повышать. Подтверждается также и тенденция к снижению положения точки M_n под влиянием легирования стали и повышения в ней концентрации углерода.

Представляет интерес оценка совместного влияния легирующих элементов на положение критических точек в стали. Из анализа данных, приведенных в таблице 2 следует, например, что совместное легирование стали такими популярными легирующими элементами, как хром и никель, оказывающими противоположное по знаку влияние, при их содержании примерно в равных количествах не должно приводить к заметному изменению температуры критической точки A_1 , поскольку коэффициенты модели для этих элементов примерно равны. Следовательно, например, у углеродистой стали 50 следует ожидать значения температуры критической точки A_1 примерно такой же, как и у легированной стали 50ХН с такой же концентрацией углерода. Это подтверждают данные, приведенные в таблице 3. Совместное присутствие в составе хрома и ванадия (сталь 50ХФ), действующих в одном направлении, приводит к повышению критической точки A_1 (табл.3).

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений температур критических точек A_1 , A_3 и M_n ряда марок конструкционных сталей

Марка стали	Критическая точка A_1 , °С		Критическая точка A_3 , °С		Критическая точка M_n , °С	
	Экспериментальные значения [3]	Расчет по модели	Экспериментальные значения [3]	Расчет по модели	Экспериментальные значения [3]	Расчет по модели
50	735	728	765	769	310	309
50ХН	735	730	755	760	300	307
50ХФ	740	746	780	788	300	306

В отношении критической точки A_3 эффект совместного влияния хрома и

никеля оказывается не скомпенсированным, поскольку, очевидно, действует фактор специфического влияния хрома, когда при его небольшой концентрации следует ожидать понижения этой температуры. Поэтому наблюдается снижение критической точки A_3 в стали 50ХН в сравнении с углеродистой сталью 50 (табл. 3). В тоже время в стали 50ХФ фиксировали повышение этой температуры в сравнении как со сталью 50ХН, так и со сталью 50 (табл.3). В рассмотренных примерах были выбраны стали с близким содержанием углерода, поскольку, судя по коэффициенту уравнения, его влияние на снижение критической точки A_3 может быть преобладающим, когда изменение его концентрации даже на 0,1 % будет более эффективным, чем влияние изменения концентрации многих других элементов на 1 % (табл. 1).

Влияние углерода на положение критической точки начала мартенситного превращения M_n также оказывается преобладающим в сравнении с эффектом других элементов (табл. 1). При этом все легирующие элементы способствуют снижению этой температуры. Следовательно, у легированных сталей эта температура должна быть ниже, чем у углеродистых, имеющих такую же концентрацию углерода (табл. 3).

Таким образом, в связи с противоположным влиянием различных легирующих элементов на критические точки A_1 и A_3 следует ожидать возможную взаимную компенсацию их воздействия на эти температуры и отсутствие заметных различий в их значениях в сравнении с углеродистыми сталями. Поэтому разработка математических моделей для теоретического расчета критических точек сталей, учитывающих комплексное влияние различных элементов, представляет не только научный, но и практический интерес.

Литература:

1. Горбатенко, В.П. Материаловедение: Учебник для технологических и механических специальностей высших учебных заведений / В.П. Горбатенко, Т.В. Новоселова. - Невинномысск: ЭльДирект, 2018. – 324 с.
2. Шапыхина, В.С. Разработка математической модели для расчета температур критических точек конструкционных сталей / В.С. Шапыхина, В.П. Горбатенко // Металлургия XXI столетия глазами молодых [Электронный ресурс]: [материалы 1X Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов]: сборник докладов / ФГБОУВО «Донецкий национальный технический университет, факультет металлургии и теплоэнергетики. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – С. 127-130.
3. Попова, Л.Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста / Л.Е. Попова, А.А. Попов. – 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Металлургия, 1991. – 503 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЧУГУНОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИЛ ТАРЕЛЬЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

Коновалов Н.А., Крымов В.Н., Симоненко В.И.
Донецкий национальный технический университет

Легированные износостойкие чугуны широко применяются в горнорудной промышленности для изготовления деталей, работающих в условиях износа. Условия работы таких деталей могут заметно отличаться. Например, колена, точки, шнеки могут работать в условиях, характеризующихся только изнашивающим воздействием. Рабочие колеса шламовых насосов подвергаются износу в коррозионной среде. Бронеплиты мельниц, била, элементы ковшей экскаватора испытывают износ при ударно-абразивном воздействии, зачастую в присутствии коррозионной среды. Последние условия являются наиболее сложными и требуют тщательного подбора свойств материала деталей [1].

Била (сектора) тарельчатой дробилки ударно-давящего действия работают в наиболее жестких условиях. Измельчаемый материал разрушается при попадании в зазор между секторами, которые движутся со значительной скоростью друг относительно друга. При этом сектора испытывают соударение с абразивом с небольшим углом атаки относительно давящей поверхности. Осколки материала могут воздействовать на сектор в режиме резания при значительном удельном давлении.

Такие условия требуют от материала бил сложного комплекса механических свойств: высокой износостойкости и удовлетворительной вязкости.

Целью данной работы являлось изучение структуры чугунов, предназначенных для изготовления бил тарельчатой дробилки.

Чугуны, составы которых приведены в табл. 1, выплавлялись в открытой индукционной печи и разливались в образцы массой 1 кг в формы по газифицируемым моделям. Марки чугунов соответствуют составам приведенным в [1]. Однако в чугуне ИЧ280Х28Н2М2 содержание углерода превысило марочное.

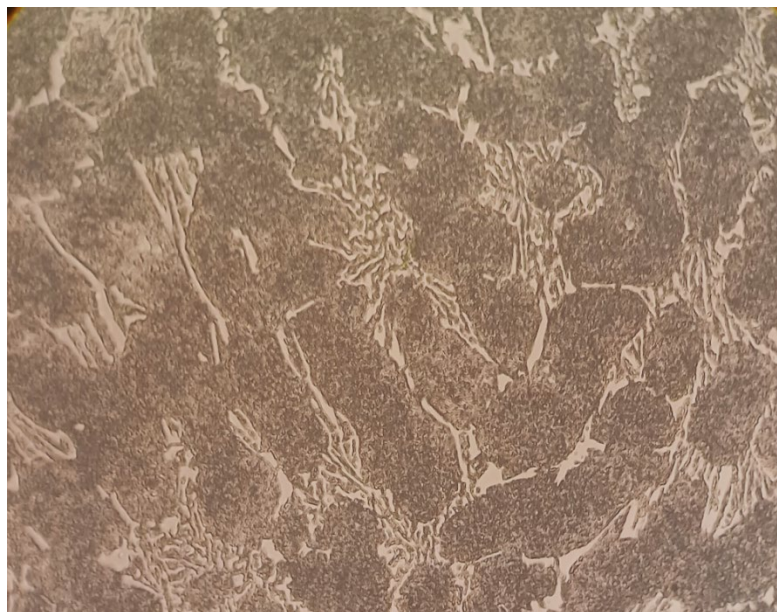
Таблица 1 – Химический состав чугунов, % масс.

Элемент	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni	P	S
ИЧ290Х12	2,1213	0,7831	2,2142	0,0067	13,6393	0,8242	0,0271	0,012
ИЧ280Х28Н2М2	3,540	1,056	1,4153	2,2294	25,3528	1,2672	0,0537	0,15

На полученных отливках измеряли твердость по ГОСТ 9013-59. На поперечных образцах изготавливали шлифы для изучения структуры по обычной методике. Количественный анализ выполняли по микрофотографиям с помощью пакета «Микроанализ».

Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3.

Структура чугунов (рис. 2) представлена металлической матрицей и карбидами. Чугун ИЧ290Х12 является доэвтекктическим, а ИЧ280Х28Н2М2 заэвтекктическим. Карбидная фаза обоих чугунов представлена карбидом M_7C_3 .



а



б

Рисунок 1 – Микроструктура чугунов ИЧ290Х12 (а) и ИЧ280Х28Н2М2 (б), $\times 500$

Максимальное содержание углерода в чугуне ИЧ280Х28Н2М2 согласно [1] составляет 3%. Очевидно, что при содержании хрома эвтекктическая точка сместилась влево. Поэтому в чугуне присутствуют крупные первичные карбиды шестигранного сечения и довольно крупные иглы эвтекктических карбидов.

Измерения показали, что оба чугуна имеют очень высокую твердость (табл. 2). Твердость приближается к максимальным значениям, получаемым в этих чугунах после термической обработки [1].

При этом микротвердость металлической матрицы свидетельствует о том, что она имеет мартенситную или троостито-мартенситную структуру (для чугуна ИЧ280Х28Н2М2).

Таблица 2 – Твердость и микротвердость металлической матрицы чугунов

Марка чугуна	Твердость, HRC	Микротвердость, Н/мм ²
ИЧ290Х12	55	5920
ИЧ280Х28Н2М2	60	5185

Такая высокая твердость чугуна ИЧ280Х28Н2М2 может быть объяснена большим количеством карбидов и, возможно, влиянием никеля, механизм которого объяснен в [2]. Никель, как и молибден увеличивает устойчивость переохлажденного аустенита. При этом молибден повышает, а никель понижает температуру точки Мн. При определенных скоростях охлаждения из аустенита выделяются карбиды, и температура мартенситного превращения повышается, что способствует росту твердости. Однако при увеличении скорости охлаждения увеличивается содержание остаточного аустенита. При снижении скорости охлаждения начинается диффузионный распад аустенита. Возможно, этим объясняется некоторое снижение микротвердости матрицы (табл. 2).

В крупных карбидах чугуна ИЧ280Х28Н2М2 заметны дисперсные темные выделения. Вероятно, это выделения аустенита, превратившегося в мартенсит при охлаждении.

Подсчет в программе «Микроанализ» показал, что в чугунах ИЧ290Х12 и ИЧ280Х28Н2М2 содержится 21 и 36 %об. карбидов, соответственно.

По данным [2] максимальное содержание карбидов M_7C_3 , до которого наблюдается линейный рост износостойкости – 32-33%. При дальнейшем увеличении рост износостойкости замедляется. Это объясняется появлением крупных первичных карбидов, которые склонны к выкрашиванию. Этот процесс особенно заметен при угле атаки абразивными частицами близким к 90°.

Таким образом, чугун ИЧ280Х28Н2М2 может обладать высокой износостойкостью только в условиях износа микрорезанием, без ударных нагрузок.

Литература:

1. Гарбер, М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М.Е. Гарбер. – М.: Машиностроение, 2010. – 280 с.
2. Цыпин, И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И.И. Цыпин. – Москва: Металлургия, 1983. – 176 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ, УПРОЧНЕННЫХ С ДЕФОРМАЦИОННОГО НАГРЕВА

Логвиненко А.А., Штыхно А.П.

Донецкий национальный технический университет

Надежность и долговечность транспортных устройств, особенно конвейерных систем, напрямую зависят от качества и износостойкости соединительных деталей. Традиционные методы изготовления крепежа часто не обеспечивают достаточного уровня прочности и износостойкости, что приводит к преждевременному выходу из строя конвейерного оборудования. В связи с этим, разработка и внедрение эффективных методов упрочнения соединительных деталей является актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений является использование деформационного нагрева при штамповке. Этот метод позволяет совместить процесс формообразования детали с ее упрочнением за счет повышения плотности дислокаций и измельчения структуры. В отличие от традиционных методов термической обработки, деформационное упрочнение позволяет получить более равномерное распределение механических свойств по сечению детали и снизить энергозатраты.

Целью данной работы является изучение влияния деформационного нагрева на структуру и свойства соединительных деталей из стали 20Г2 для транспортных устройств.

Для проведения исследований были изготовлены образцы соединительных деталей из стали 20Г2 по следующей технологической схеме: использовался горячекатаный прокат диаметром 11 мм, проводилась холодная штамповка с использованием деформационного нагрева и, для сравнения, традиционная закалка от 900-920°C с последующим отпуском при различных температурах.

Образцы были разделены на четыре группы: исходный прокат, образцы, упрочненные с отдельного нагрева (традиционная закалка и отпуск), образцы после штамповки с охлаждением на воздухе и образцы, упрочненные со штамповочного нагрева (деформационное упрочнение). Внешний вид исходных заготовок и образцов после штамповки представлен на рисунке 1.



а



б

Рисунок 1 – Внешний вид исходных заготовок (а) и после штамповки (б)

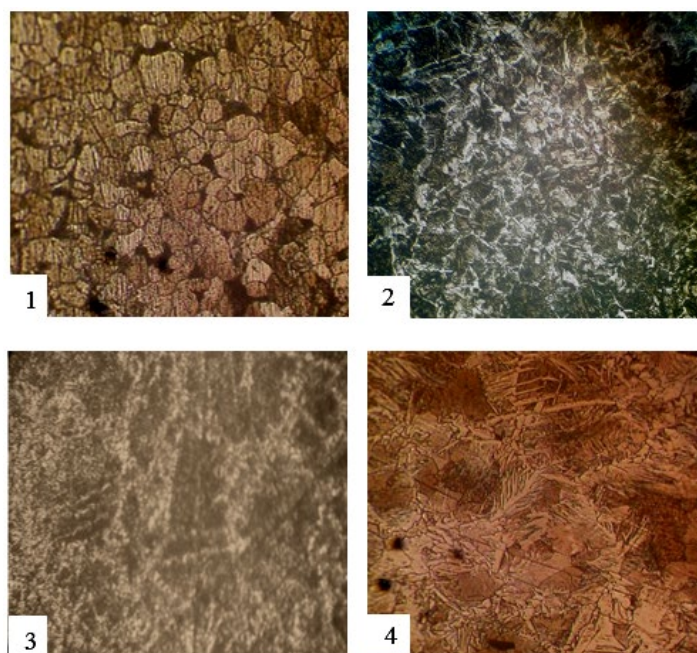
Для оценки структуры и свойств материала использовались следующие методы: определение химического состава на спектрометре, измерение твердости по Роквеллу (HRC) и микротвердости по сечению образцов, исследование микроструктуры на оптическом микроскопе с использованием травления в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Химический состав исследованных образцов соответствовал требованиям, предъявляемым к стали 20Г2 (Таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемых образцов стали 20Г2, % масс

C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu	Al	Ti
0,22	1,37	0,19	0,23	0,014	0,022	0,01	0,03	0,035	0,01

Анализ микроструктуры показал, что деформационное упрочнение приводит к существенному измельчению зерна и повышению плотности дислокаций в структуре стали 20Г2 (рисунок 2).



1 – исходная заготовка; 2 – упрочненный с отдельного нагрева;
3 – охлажденные после штамповки на воздухе; 4 – упрочненные со штамповочного нагрева

Рисунок 2 – Микроструктура образцов из стали 20Г2 после различных режимов обработки, х400

Из рисунка 2 видно, что микроструктура образцов исходных заготовок, отрубленных от проката (1), является неоднородной и состоит из ферритной матрицы с перлитными включениями. Микроструктура образцов подвергнутых

упрочнению с отдельного нагрева (2), состоит из более мелких зерен, что свидетельствует о том, произошел процесс аустенитизации. В структуре образцов, охлаждённых после штамповки на воздухе (3), присутствует ферритная сетка и бейнитная составляющая, вследствие высокой температуры произошло бейнитное превращение, в центре присутствует нижний бейнит и наблюдаем укрупнение вытянутых колоний. Структура образцов, упрочненных со штамповочного нагрева (4), состоит из мартенсита и нижнего бейнита, по центру присутствует троостит и бейнит. Измерение твердости показало, что деформационное упрочнение со штамповочного нагрева обеспечивает более высокую твердость по сравнению с традиционными методами термической обработки, кроме того, обеспечивает более равномерное распределение микротвердости по сечению детали. Результаты измерения твердости после различных режимов обработки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Твердость образцов стали 20Г2 после различных режимов обработки

Образец	Минимальное значение (HRC)	Максимальное значение (HRC)	Среднее значение (HRC)
Исходная заготовка	23	31	28
Упрочнение с отдельного нагрева	23	31	28
После штамповки (охлаждение на воздухе)	23	31	26
Упрочнение со штамповочного нагрева	24	45	30

Данные исследования подтверждают эффективность деформационных методов упрочнения для улучшения механических свойств сталей, включая измельчение зерна и формирование благоприятных остаточных напряжений.

Таким образом, деформационное упрочнение эффективно повышает прочность и износостойкость соединительных деталей из стали 20Г2, обеспечивая равномерное распределение механических свойств по сечению. Рекомендуется применять эту технологию на предприятиях для улучшения надежности и долговечности деталей транспортных устройств.

Литература:

1. Акулич, Н.В. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие / Н.В. Акулич – Минск: Новое знание, 2008 – 272 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 5ХНМ

Логвиненко А.Н., Штырно А.П.
Донецкий национальный технический университет

Повышение работоспособности штампового инструмента из стали 5ХНМ является важной задачей в машиностроении. Для решения этой проблемы применяются различные методы термической обработки, которые улучшают эксплуатационные характеристики материала. Локальное термическое упрочнение с использованием различных режимов нагрева и охлаждения является одним из эффективных подходов. Однако данный процесс может привести к остаточным напряжениям и дефектам, поэтому изучение структуры и свойств стали после обработки является актуальным направлением исследований.

Исследования проводились на образцах стали 5ХНМ, полученных из фрагментов вышедшего из строя штампового инструмента (пуансонов) - рис.1.



Рисунок 1 - Исследуемый пуансон

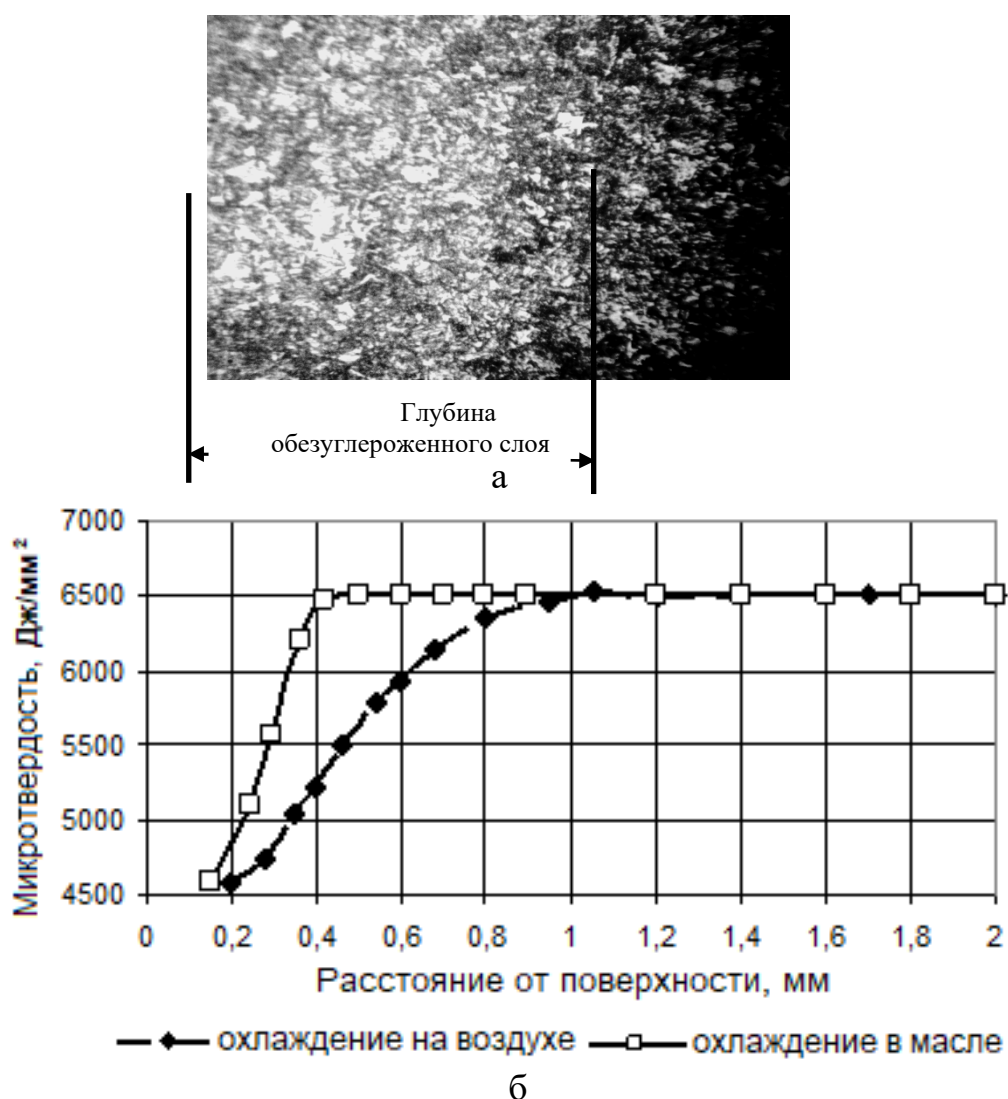
Химический состав стали 5ХНМ был определён с применением спектрального анализа. Результаты химического анализа соответствовали требованиям ГОСТ 5950 с незначительными отклонениями (Таблица 1).

Таблица 1 - Химический состав стали 5ХНМ, % масс.

Элемент	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu
Факт. (%)	0,53	0,28	0,61	1,42	0,61	0,16	0,028	0,029	0,025
ГОСТ (%)	0.5- 0.6	0.1- 0.4	0.5- 0.8	1.4- 1.8	0.5- 0.8	0.15- 0.3	До 0.03	До 0.03	До 0.3

Образцы нагревали под ковку до 1200-1250 °С, выдерживали 15-20 мин и

охлаждали послековки в масле и на воздухе (для сравнения), затем отжигали при 760-780 °С. Часть образцов подвергали окончательной термической обработке (закалка + отпуск), при этом регулировали температуру отпуска. Часть образцов подвергли изотермической закалке с охлаждением в расплаве соли (46% NaNO₃ + 27% NaNO₂ + 27% KNO₃) при температуре 230-250 °С. После термообработки была исследована микроструктура, измерена твердость, проведены испытания на ударный изгиб и изучена глубина обезуглероженного слоя. Важно отметить, что в результате охлаждения послековки в масле уменьшается глубина обезуглероженного слоя примерно в 2 раза, по сравнению с охлаждением на воздухе (рис. 2).



а – микроструктура обезуглероженного слоя, $\times 100$; б – график распределения микротвердости по сечению образца от поверхности

Рисунок 2 – Глубина обезуглероженного слоя послековки образца из стали 5ХНМ с различной скоростью охлаждения

Это один из важных факторов, влияющих на качество термообработанной

заготовки и экономию металла в целом. Уменьшение глубины обезуглероженного слоя приведет к минимизации припусков, остающихся на механическую и термическую обработку штампового инструмента.

Проведенные экспериментальные режимы упрочняющей обработки образцов из стали 5ХНМ с использованием тепла деформационного (ковочного) нагрева позволили получить следующие показатели механических свойств, представленных в таблице 2.

Таблица 2 - Эффективные режимы термической обработки стали 5ХНМ и полученные результаты.

Режим обработки	HRC	KCU. Дж/см ²	σ_t , Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	Относит-я износо- стойкость, %
1. Ковка, охлаждение на в-хе, Отжиг, закалка в масле, Отпуск при 230-250°C, 2 ч	54-56	13,9	1780	1485	0,2
2. Ковка, охлаждение в масле, Отжиг, закалка в масле, Отпуск при 230-250°C, 2 ч	55-57	14,7	1796	1500	0,22
3. Ковка, охлаждение на в-хе, Отжиг, закалка в расплаве соли с T=230-250°C, 20 мин	54-56	18,3	1840	1560	0,225
4. Ковка, охлаждение в масле, Отжиг, закалка в расплаве соли с T=230-250°C, 20 мин	55-58	19,8	1870	1580	0,23

Таким образом, оптимизация режимов термической обработки штампового инструмента из стали 5ХНМ нацелена на увеличение его износостойкости и ударной вязкости для предотвращения образования усталостных трещин в процессе эксплуатации. Охлаждение в масле послековки предпочтительно, так как оно способствует измельчению зерна и сокращает глубину обезуглероженного слоя. Наиболее стабильные и высокие свойства для штампового инструмента из стали 5ХНМ обеспечивает охлаждение послековки в масле до температур 300-350 °C, отжиг с последующей изотермической закалкой в расплаве соли при температуре 230-250 °C. После проведения таких режимов износостойкость штампового инструмента повысится на 20-30%.

Литература:

1. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Металлургия, 1993. – 448 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Меликова Т.Н., Штыхно А.П.

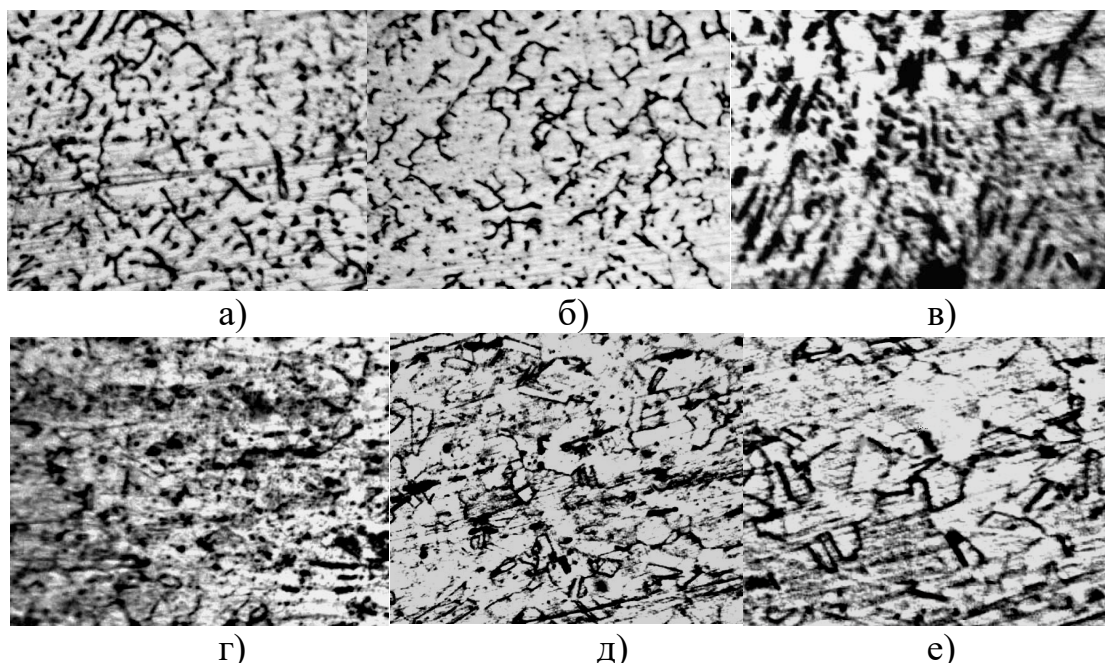
Донецкий национальный технический университет

Стальные технологические трубопроводы занимают значительное место в народном хозяйстве. Потребность в них постоянно растет в связи с необходимостью транспортировки нефти, газа, кислот, щелочей различных концентраций и температур в пределах нашей страны и за ее пределы. Особенностью работы технологических трубопроводов является то, что они эксплуатируются в условиях повышенной коррозионной агрессии. Поэтому к материалу и сварным соединениям предъявляются особые требования. Стали, из которых изготавливаются технологические трубопроводы должны быть коррозионностойкими, но даже нержавеющие стали, а соответственно и сварные соединения из них подвержены межкристаллитной коррозии при транспортировке растворов с температурой до 500 °С, а также к местной коррозии сварных соединений ножевого типа и к точечной коррозии под воздействием азотной, серной и соляной кислот. Склонность нержавеющих сталей и сварных соединений к коррозионному разрушению может быть устранена с помощью термической обработки [1].

Поэтому целью данной работы является изучение влияния режимов термообработки на структуру и свойства сварных соединений нержавеющих сталей для технологических трубопроводов, с целью повышения их коррозионной стойкости и качества в целом.

Исследования проводились на образцах труб из низкоуглеродистых и высоколегированных сталей 08Х12Н10Т и 12Х18Н12Т, сваренных аргонодуговой сваркой под слоем флюса, неплавящимся вольфрамовым электродом. Присадочная проволока использовалась с тем же химическим составом, что и в основном металле.

Для изучения структуры и свойств сварных соединений были отобраны образцы со сварным швом, изготовлены микрошлифы и измерена твердость по сечению. Исходная микроструктура образца стали 08Х12Н10Т изображена на рис. 1, из которого видно, что в зонах наплавленного металла и термического влияния наблюдается аустенито-ферритная структура, участок перегрева имеет крупнозернистую структуру феррита в виде дендритов и аустенита, по мере удаления от зоны сплавления величина зерна уменьшается и в зоне нормализации наблюдается мелкозернистая структура. В зонах неполной перекристаллизации и основного металла наблюдается разнотекстурность аустенита полиэдричной формы с незначительными включениями карбидов по границам зерен. Такая неоднородность микроструктуры оказывает негативное влияние на свойства сварного шва и может способствовать развитию межкристаллитной коррозии при контакте с агрессивными средами.



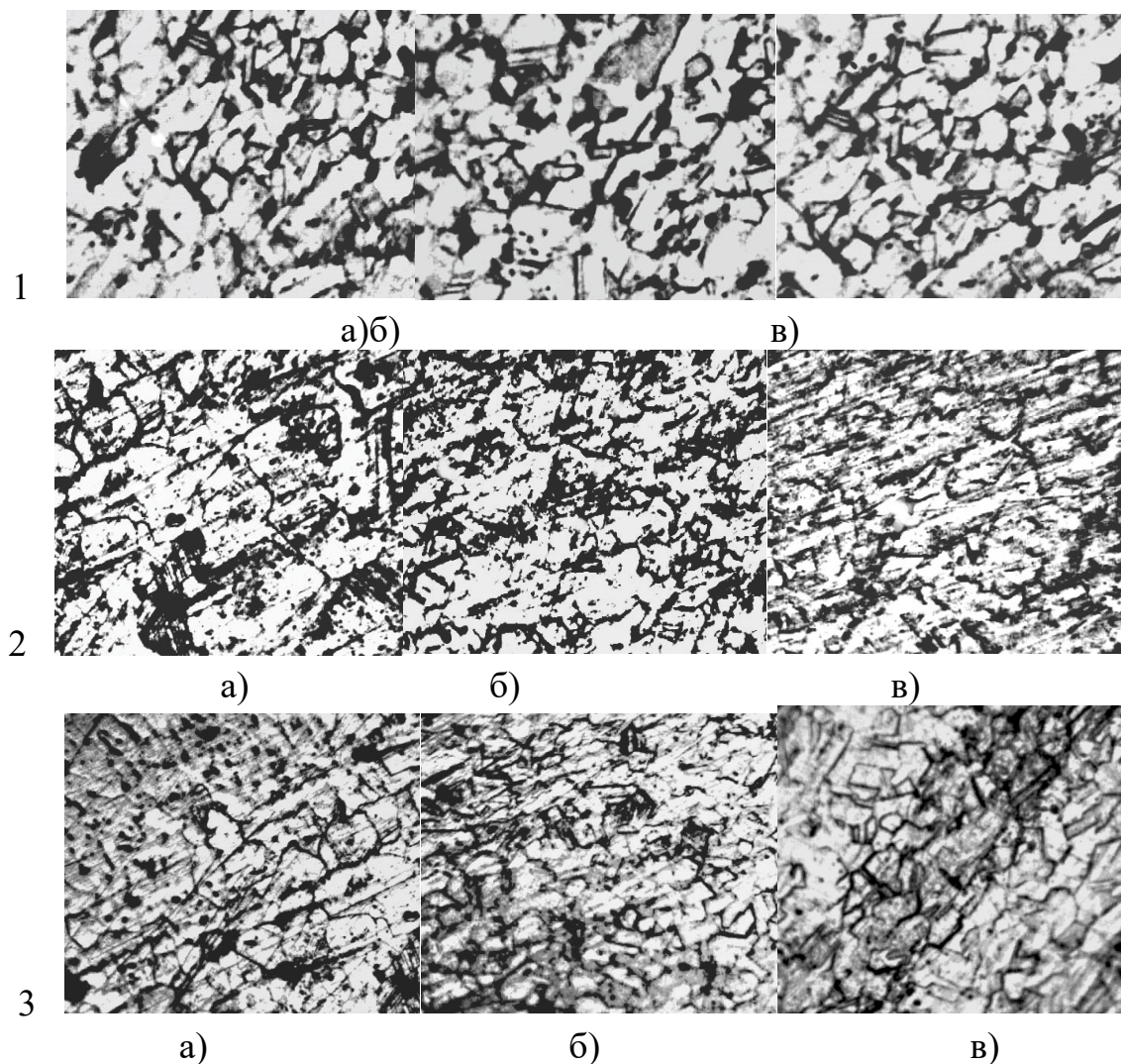
а) зона наплавленного металла; б) участок неполного расплавления; в) участок перегрева; г) участок нормализации; д) участок неполной перекристаллизации; е) зона основного металла

Рисунок 1 – Микроструктура образца сварного соединения стали 08X12N10T, х 250.

Причиной заниженной технологичности сварных соединений с такой структурой является разница в физических свойствах аустенита и феррита (разная прочность, температура и скорость рекристаллизации, разный коэффициент температурного расширения). Также для исходной структуры характерным является неравномерное расположение карбидов, в таком состоянии карбиды титана и хрома из-за малой устойчивости приводят к межкристаллитной коррозии. Все это приводит к формированию концентраторов напряжения в сварном шве, снижению коррозионной стойкости соединения, влияет на механические свойства, поэтому необходимо стабилизировать структуру с помощью термообработки [2].

Термообработка образцов сварного соединения проводилась по режимам стабилизирующего отжига, закалки и нормализации. По режиму стабилизирующего отжига образцы нагревали до 875 °С, выдерживались 3 часа, после чего охлаждались с печью. По режиму закалки образцы нагревали до 1050 °С, выдерживали 15 минут, охлаждались в воде. Термообработку по режиму нормализации проводили с нагревом до 1050 °С, выдержкой 15 минут и охлаждением на спокойном воздухе. Закалка от 1050°С преследует цель полного растворения карбидов, после образования гомогенного γ -твердого раствора с карбидами титана TiC при температуре 900-1100 °С необходимо быстрое охлаждение, для его фиксирования.

Микроструктура образцов сварного соединения стали 08X12N10T после стабилизирующего отжига, закалки и нормализации с указанием зон термического влияния приведена на рис.2.



1 – стабилизирующий отжиг; 2 – закалка; 3 – нормализация;

а) зона наплавленного металла; б) зона термического влияния; в) зона основного металла.

Рисунок 2 - Микроструктура образцов сварного соединения стали 08X12H10T после различных режимов термообработки, х 250

Из анализа микроструктур видно, что образцы после термообработки имеют аустенитную структуру с равномерным распределением карбидов. Стабилизирующий отжиг одновременно с выделением карбидов из аустенита приводит к развитию диффузионных процессов в аустенитных зернах и к обогащению пограничных участков зерен хромом. Закалка приводит к повышению устойчивости аустенита за счет растворения карбидов, которые выделились при сварке, в структуре это отражается утолщением границ зерен аустенита. Нормализация тоже приводит к растворению карбидов и стабилизации аустенита, но дальнейшее охлаждение на воздухе может привести к их повторному выделению.

Коррозионные испытания образцов из стали 08X12H10T в 65 % водном растворе HNO_3 и 5 % водном растворе HCl в течение 6 часов до и после термообработки показали, что в 5%-м растворе HCl основной металл и сварной шов корродируют намного быстрее, чем в 65%-м растворе HNO_3 (рис.3).

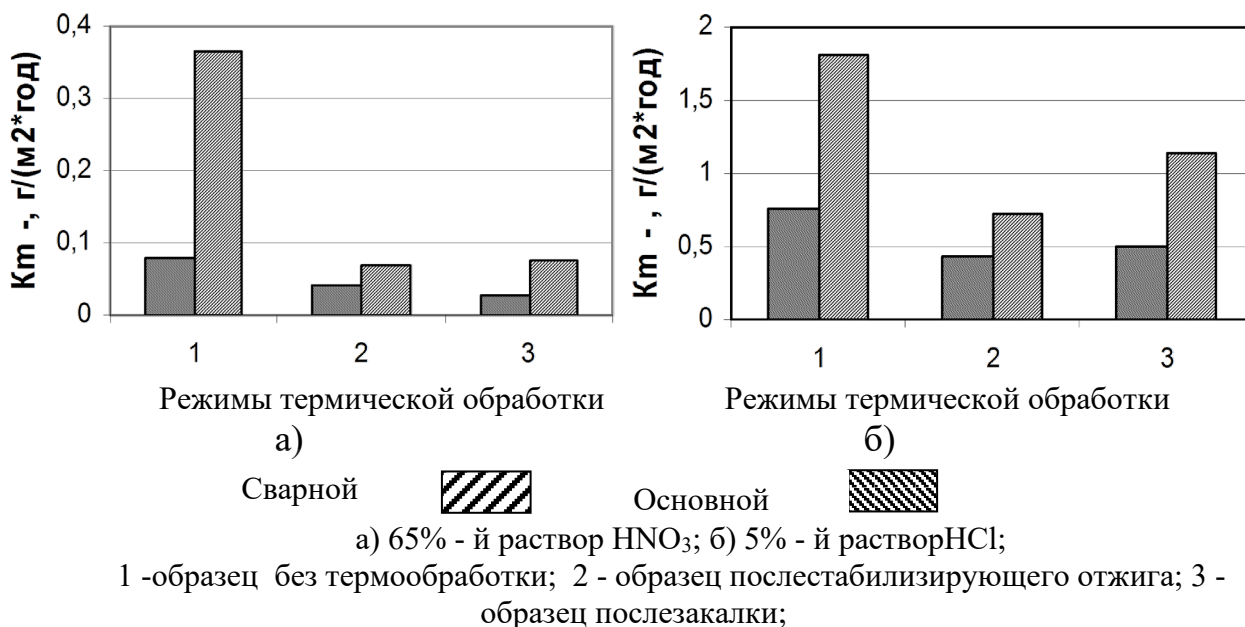


Рисунок 3 – Зависимость показателя коррозии для сварного соединения стали 08X12H10T

Как можно видеть из рисунка 3, термообработка способствует повышению коррозионной стойкости в 2-2,5 раза, особенно в 65% - ном растворе HNO_3 что обусловлено повышением концентрации хрома на границах зерен аустенита, получению более равновесной дисперсной структуры и получению равнопрочного сварного соединения.

Из результатов исследования влияния термической обработки сварных соединений на структуру и свойства коррозионностойких сталей для технологических трубопроводов можно сделать следующие выводы. Термообработка по всем режимам способствует образованию аустенитной структуры во всех зонах сварного соединения, наиболее равномерную аустенитную структуру обеспечивает стабилизирующий отжиг. Закалка сварного соединения приводит к повышению коррозионной стойкости, что связано с растворением карбидов хрома и титана в аустените.

Положительные изменения в структуре, повышение свойств, значительное повышение коррозионной стойкости приводят к улучшению качества труб, уменьшению риска образования трещин, поводов, короблений труб и, как следствие, продлению срока их эксплуатации. При повышении качества труб уменьшается вероятность возникновения экологической катастрофы, взрыв, пожар и прочее.

Литература:

1. Корольков П.М. Особенности термической обработки сварных соединений трубопроводов из коррозионно-стойкой стали /П.М.Корольков // Сварочное производство. – 2005, № 7. – С. 48 – 52.
2. Лившиц Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С .Лившиц, А.Н. Хакимов - М.: Машиностроение, 1989. - 336с.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Перевалов С.И., Петрущак С.В.

Донецкий национальный технический университет

При производстве машиностроительной продукции, деталей машин и технологического оборудования, таких как валы (в том числе и коленчатые), вал-шестерни, зубчатые колеса, оси и другие детали (рис.1), наиболее часто используются конструкционные среднеуглеродистые и легированные стали [1, 2].



а



б

а – коленчатый вал;

б – шестерня

Рисунок 1 – Примеры деталей технологического оборудования

Для обеспечения эксплуатационных свойств сменных деталей технологического оборудования используют различные виды термической обработки, обеспечивающие повышение прочности, вязкости, износостойкости.

Для исследований были отобраны образцы сталей с содержанием 0,4-0,5% углерода. Химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых марок сталей, %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al
40	0,43	0,28	0,59	0,10	0,07	0,16	0,018
45	0,48	0,29	0,56	0,13	0,09	0,15	-
50Г	0,56	0,26	0,86	0,09	0,07	0,126	-

Для указанных марок сталей исследовали влияние на структуру и свойства температуры нагрева при термообработке.

Были подготовлены образцы одинаковой формы размером 20*20*30 мм. На образцах были проведены различные режимы термообработки:

- полная и не полная нормализация - нагрев до 850-870 °С и 770-790 °С

соответственно, охлаждение на воздухе;

- полная и не полная закалка - нагрев до 850-870 °С и 770-790 °С соответственно, охлаждение в воде (масле для 50Г);

- полная и не полная закалка с высоким отпуском - нагрев до 850-870 °С и 770-790 °С соответственно, охлаждение в воде (масле для 50Г) и отпуск при 580-620°С.

На образцах стали 40, 45, 50Г, в соответствии с режимами термообработки, которые приведены выше была исследована микроструктура сталей при увеличении $\times 400$.

Из анализа микроструктур видно, что структура сталей после закалки от температур 850-870 °С представляет собой мартенсит, а после закалки от температур 770-790 °С мы можем наблюдать участки избыточного феррита.

Структуры, полученные после закалки, повлияли на формирование структур после отпуска: структура сталей представляет собой сорбито-тритит как при полной так и при неполной закалке, однако при неполной закалке наблюдаются участки избыточного феррита.

Следует также отметить, что с увеличением содержания углерода в стали, после неполной закалки, увеличивается содержание избыточного феррита.

На образцах после термической обработки было проведено измерение твердости на приборах ТШ-2 (Бринелль) и ТК-2М (Роквелл).

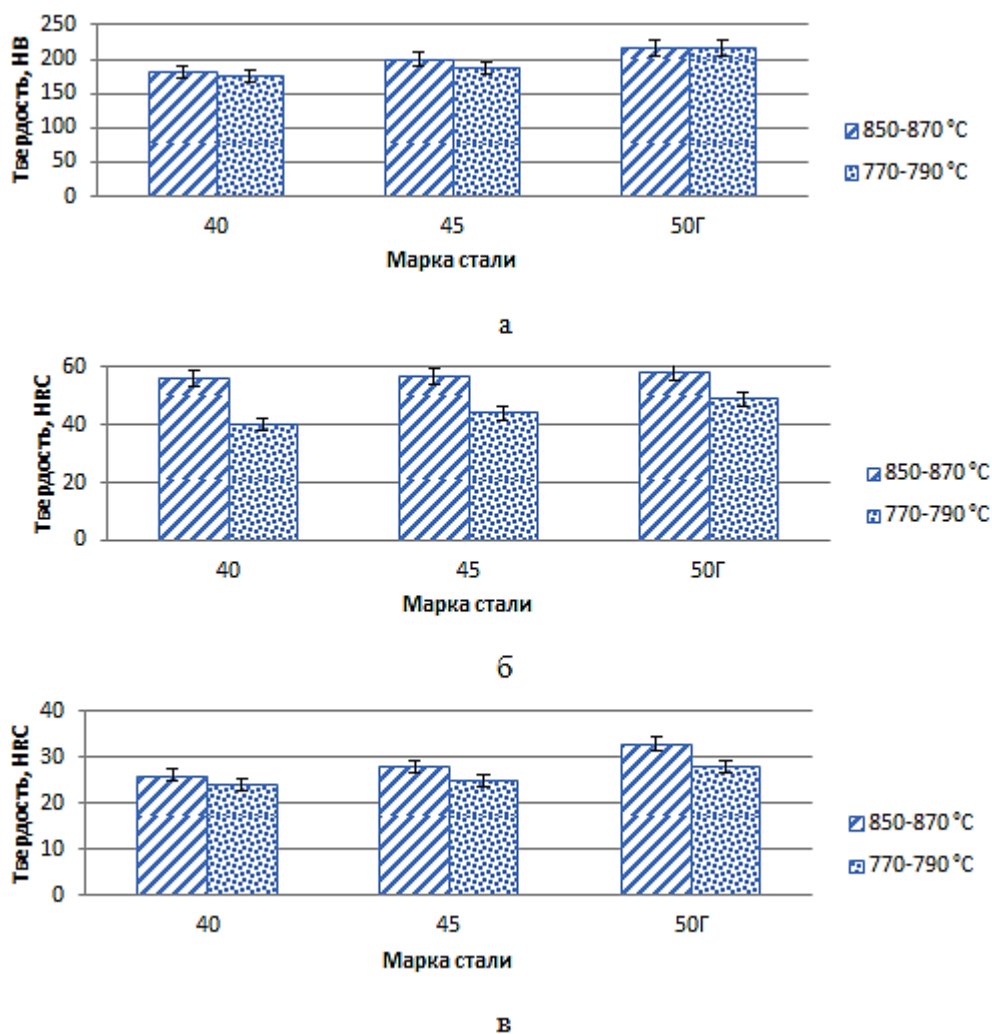
Результаты измерения твердости были обработаны в программе MS Excel 2010 (модуль «Пакет анализа») и по полученным результатам построены соответствующие графики (рис.2).

Как видно из графиков самая низкая твердость соответствует режиму нормализация, при этом разницы твердости сталей после полной и неполной нормализацией практически нет.

Как и следовало ожидать, наиболее высокие значения твердости получены в результате полной закалки. При неполной закалке значения твердости на 9-13 единиц HRC ниже. При чем, с увеличением содержания углерода и наличия легирующих элементов разница показаний твердости после полной и неполной закалке уменьшается.

Проведение высокого отпуска значительно снижает твердость образцов. Особенно это заметно на стали 40 и 45, у которых твердость понизилась ниже 30 HRC независимо от температуры нагрева под закалку. У стали 50Г снижение твердости также существенно, но для образцов после полной закалки твердость составила 33 HRC.

Следует также отметить, что наблюдается закономерность - не зависимо от режима обработки с увеличением содержания углерода и наличия легирующих элементов значения твердости возрастают.



а – нормализация; б – закалка; в – закалка + высокий отпуск

Рисунок 2 – График измерения твердости после проведенных режимов термической обработки

Таким образом, из исследованных режимов термической обработки сталей 40, 45, 50Г для дальнейшего использования на производстве можно рекомендовать либо улучшение с закалкой от 850-870 °С.

Литература:

1. Солнцев, Ю.П. Материаловедение : учебник для вузов / Ю.П.Солнцев, Е.И.Пряхин. - Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2024. — 783 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н.Арзамасов, В.И.Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Арзамасова Б.Я., Мухина Г.Г. 8-изд., стереотип. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 648 с.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ДИФфуЗИОННЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Савула Е. А., Крымов В. Н., Горбатенко В. П.
Донецкий национальный технический университет

Борирование является одним из самых эффективных методов химико-термической обработки. По распространенности борирование заметно уступает цементации и нитроцементации, хотя по технологическим параметрам они очень близки. При этом, борированные слои на стали характеризуются следующими преимуществами:

- борирование является в основном одинарной обработкой, т.е., после насыщения поверхности не требуется дополнительная термообработка;
- твердость боридных слоев в 1,5-2 раза превосходит твердость цементованных; борированная поверхность устойчива при износе самым распространенным абразивом – оксидом кремния.

Некоторой неопределенностью характеризуется вопрос коррозионной стойкости борированных слоев на сталях. Хорошо известно, что сами бориды обладают очень высокой устойчивостью в целом ряде агрессивных сред, в том числе, в расплавах разных веществ. Вместе с тем, не рекомендуется использовать борированные изделия в условиях атмосферной коррозии, когда преобладает коррозионное разрушение. Борированная сталь в нейтральной коррозионной среде достаточно быстро покрывается продуктами коррозии. В этой связи актуальным является вопрос повышения коррозионной стойкости боридных покрытий.

Контроль качества борированного слоя осуществляется по следующим параметрам:

- толщине;
- фазовому составу;
- химическому составу;
- твердости;
- сплошности внешней зоны;
- микроструктуре.

Основной характеристикой является толщина покрытия. Основным методом его определения является металлографический. Главным недостатком этого метода является трудоемкость и необходимость разрушения изделия или использования образца-свидетеля. В настоящее время разработан широкий спектр приборов для оценки толщин покрытий различного типа, основанных на разных принципах работы.

Целью данного исследования является сравнение результатов измерения толщины диффузионного боридного слоя по обычной методике и с использованием толщиномеров различного типа для оценки их точности. Для

этого измерения выполняли с использованием методов магнитной и вихретоковой толщинометрии.

В качестве материала для исследования использовали образцы стали Ст 3, подвергнутые диффузионному борированию. Обработка проводилась в смеси карбида бора и фтористого натрия (в соотношении компонентов 98:2) при температурах 930-950°C в течении 4 часов с последующим охлаждением на воздухе.

Шлифы для микроструктурного анализа и определения микротвердости готовили по стандартной методике: шлифовка на абразивном круге, наждачной бумаге разной зернистости и полировка на полировальном станке с использованием суспензии оксида хрома. В качестве травителя для выявления микроструктуры применяли 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Микроструктуру полученного боридного слоя исследовали на микроскопе МИМ-7, для определения длины игл боридов дополнительно использовали окуляр-микрометр. Также для оценки толщины слоя использовали толщиномеры ТМ-4 «Кропус» и К-5 «Константа». В основу работы прибора К-5 «Константа» положены вихретоковый фазовый, вихретоковый параметрический и импульсный индукционный методы получения первичной информации. Работа толщиномера ТМ-4 «Кропус» основана на измерении величины ЭДС, возникающей в измерительной обмотке магнитоиндукционного преобразователя, при установке его на изделие.

Микроструктура приповерхностного слоя борированных образцов представлена на рисунке 1. Хорошо визуализируется структура подложки и сформированный боридный диффузионный слой: характерные иглы боридов, часто с закругленными концами, величина игл намного превышает толщину сплошного слоя. При этом бориды FeB и Fe₂B не дифференцируются.

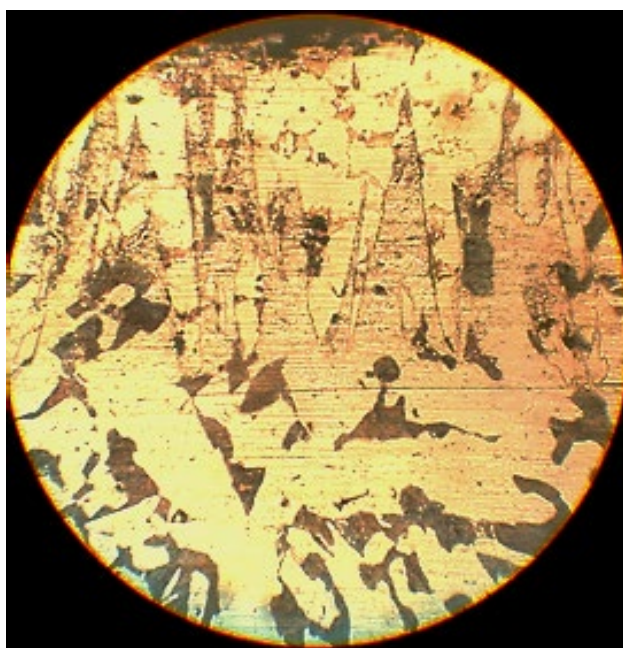


Рисунок 1 – Микроструктура боридного диффузионного слоя, x400

Измерение глубины диффузионного слоя при помощи микроскопа и окуляр-микрометра проводилось отдельно по глубине зоны игл и сплошного слоя в 30 точках; с использованием толщиномеров проводилось 30 измерений на каждом приборе в одинаковых точках. Результаты статистической обработки полученных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 –Результаты измерения глубины боридного слоя различными методами

Статистические характеристики	Прибор и метод оценки толщины			
	Окуляр-микрометр		ТМ-4	К-5
	Общая толщина	Сплошной слой	«Кропус» (магнитный)	«Константа» (вихретоковый)
Среднее, мкм	119,20	23,93	10,80	14,30
Стандартная ошибка, мкм	7,95	2,98	0,33	0,72
Медиана, мкм	108	21	11	13,5
Мода, мкм	105	15	10	13
Стандартное отклонение, мкм	30,79	11,55	1,03	2,26
Минимум, мкм	69	8	9	12
Максимум, мкм	177	54	12	19
Доверительный интервал, мкм	17,05	6,39	0,74	1,62
Коэффициент вариации cov, %	25,8	48,3	9,6	15,8

Из полученных данных видно, при оценке толщины с помощью окуляр-микрометра общая толщина слоя (с иглами боридов) составляет $119,2 \pm 17,05$ мкм, в то время как сплошной слой характеризуется глубиной $23,93 \pm 6,39$ мкм. При этом наиболее часто встречающееся в выборках значение (мода) в обоих случаях несколько ниже среднего (на 6-8 мкм). Также важно отметить величину стандартного отклонения, указывающего на удовлетворительный разброс данных в пределах выборки. При этом коэффициент вариации характеризуется довольно высокими значениями и для сплошного слоя составляет почти 50%, что говорит о большом разбросе данных относительно среднего.

Судя по значениям, полученных при измерениях с использованием толщиномеров, они измеряют сплошной боридный слой. Это может быть связано с различием свойств слоев FeV и Fe₂V, характерных для боридных покрытий. Бориды проявляют парамагнитные свойства (по некоторым источникам они являются антиферромагнетиками [1]). В частности, магнитные

свойства, согласно исследованиям [2, 3] значительно зависят от концентрации бора (в бориде Fe_2B она составляет около 9% масс., в то время как в FeB – 17% масс). Таким образом, приборы с высокой вероятностью в качестве покрытия воспринимают верхний сплошной слой FeB .

Что касается статистических характеристик данных, полученных при определении толщины слоя с помощью толщиномеров, мода и медиана в обоих случаях близки как между собой, так и со средним значением (в пределах 1,5 мкм), низкая стандартная ошибка подтверждает более высокую точность среднего значения по сравнению с измерением окуляр-микрометром. При сравнении измерений приборов можно отметить, что ТМ-4 «Кропус» показывает более точные результаты, что отмечается по меньшему стандартному отклонению, коэффициенту вариации и малому доверительному интервалу.

Таким образом, лучшие результаты по оценке толщины сплошного боридного слоя получены с помощью прибора ТМ-4 «Кропус», основанного на измерении величины ЭДС. Важно отметить, что размеры зоны боридных игл можно оценить только путем микроструктурного анализа. Перспективным направлением является создание новых методик исследований или поиск методов калибровки существующих приборов для оценки многослойных (в т.ч. неравномерных) покрытий с различными свойствами слоев, сформированных на стальной подложке.

Литература:

1. Wang, S. Discovery of intrinsic two-dimensional antiferromagnets from transition-metal borides / S. Wang, N. Miao, K. Su et al. // *Nanoscale*. – Vol. 15. - №17. – P.: 8254-8263.
2. Ляхова, М. Б. Доменная структура и магнитные свойства соединений железа и бора / М. Б.Ляхова, О. В. Жданова // *Вестник ТвГУ. Серия: Физика*. – 2009. - №5. – С. 9-17.
3. Dashev, D. E. Electron beam processes in the synthesis of boride coatings (FeB и Fe_2B) in vacuum, the phase composition, structure and properties / D. E. Dashev, N. N. Smirnyagina // *Plasma emission electronics*. – 2018. – P.:148-152.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА КАЧЕСТВО СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Штыхно Т.А., Матвиенко В.Н.

Приазовский государственный технический университет

Одной из важнейших задач в области трубопроводного транспорта является поддержание оптимального состояния линейной части как промышленных, так и магистральных газопроводов. В процессе эксплуатации этих систем могут возникать различные проблемы, касающиеся обеспечения их безопасной работы. В трубопроводах могут возникать такие дефекты, как расслоение материала, вмятины, коррозионные каверны, стресс-коррозионные трещины, эрозионный износ, царапины и прочие [1].

Дефекты в сварных соединениях трубопроводов способны значительно ухудшать функциональность конструкций и, при определенных условиях, приводить к их разрушению. Поэтому для оценки надежности сварных конструкций и определения требований к качеству сварных соединений необходимо учитывать влияние наиболее распространенных дефектов на прочность этих соединений. Основной причиной возникновения дефектов является отклонение рабочих параметров от установленных допусков.

Дефекты трубопроводных конструкций можно классифицировать на: дефекты труб и дефекты сварных соединений.

Дефекты труб могут развиваться при эксплуатации трубопроводов и даже способствовать их разрушению.

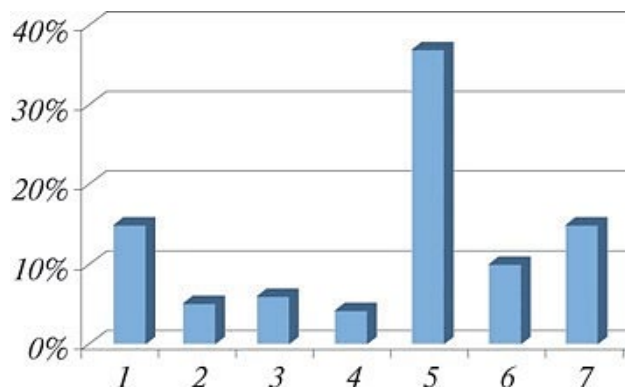
Дефекты сварных соединений – это отклонения от установленных норм, которые снижают прочность и эксплуатационную надежность соединений, что может привести к разрушению всей конструкции. Наиболее распространенными дефектами являются нарушение геометрических размеров формы усиления сварного шва, а также дефекты макро- и микроструктуры, деформация и коробление.

К дефектам формы и размеров относятся наплывы, подрезы, прожоги и незаваренные кратеры. Микроструктурные дефекты включают микропоры, микротрещины, нитридные и газовые включения, крупнозернистость, а также участки перегрева и пережога. Анализ основных дефектов, наблюдаемых на газопроводах, показывает, что сварные швы представляют собой наиболее уязвимые участки [1].

Таким образом, с учетом роста трубопроводных сетей для транспортирования природного газа, нефти и других веществ, которые подвергаются высоким рискам аварий, проблема безопасности и надежности эксплуатации трубопроводов становится особенно актуальной. Обеспечение безотказной работы газопроводов является крайне важной задачей. Наиболее часто встречающиеся дефекты на трубопроводах приведены на рис. 1.

В данной работе рассматриваются причины возникновения дефектов в сварных соединениях труб, сваренных электродуговой сваркой, а также

классификация, методы обнаружения и анализ этих дефектов.



1 – крепежная часть трубопровода; 2 – фланцевые соединения; 3 – трубопроводная арматура; 4 - устройство для дренажа и продувки; 5 – сварные швы; 6 – конструкционные особенности элементов трубопровода; 7 – наличие повреждений наружной поверхности (в т.ч. коррозионных и механических)

Рисунок 1 – Наиболее частые дефекты, наблюдаемые на трубопроводах

Для исследований были отобраны образцы труб диаметром 159 мм с толщиной стенки 6 мм. На этих образцах проведен визуально-измерительный контроль (ВИК) и анализ выявленных поверхностных дефектов, среди которых основными являются нарушения формы и размеров сварного шва. Некоторые из них приведены на рис. 2.



а



б



в



г

а – трещина и поры, выходящие на поверхность; б – подрезы;
в - прожог и трещина; г - вогнутость корня шва.

Рисунок 2 – Основные виды поверхностных дефектов сварных швов

Однако наибольшую опасность представляют внутренние дефекты, которые необходимо выявлять неразрушающими методами, поэтому все образцы подвергались радиографическому контролю (РК), позволяющему получить более точную информацию о видах и размерах внутренних дефектов. Распределение дефектов сварных соединений труб диам.159х6 мм по результатам ВИК и радиографического контроля представлено на рис.3.

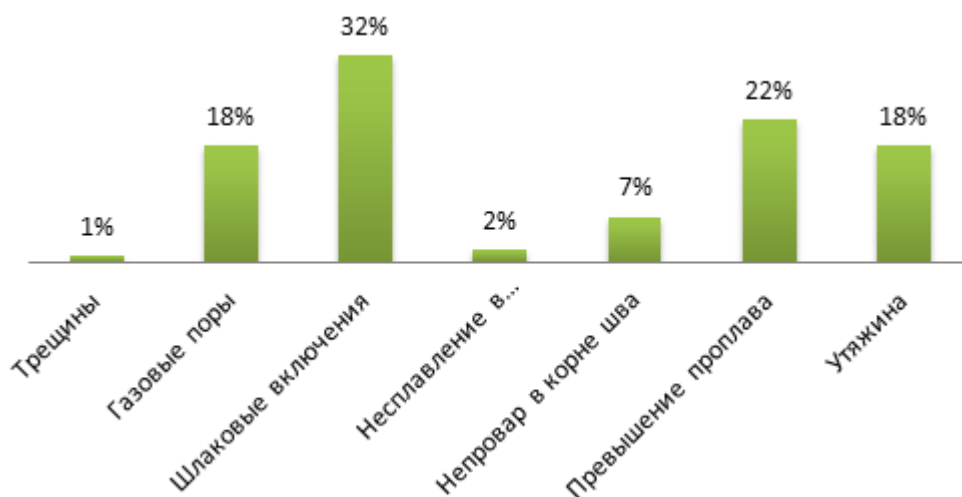


Рисунок 3 – Диаграмма распределения дефектов сварных соединений труб диам.159х6 мм по результатам ВИК и радиографического контроля

Из диаграммы видно, что почти половина (47%) дефектов обнаружена в корне сварного шва, из которых около 10% (22% от общего числа дефектов) составляют превышения проплава, а около 8% (18% от общего числа дефектов) – утяжины. Эти дефекты не являются критическими, если они не превышают установленных размеров. Наиболее значительное влияние на качество сварных соединений оказывают дефекты, такие как шлаковые включения, превышение проплава и утяжины. Однако при анализе критичности дефектов, превышение проплава и утяжины исключаются из списка наиболее опасных. Газовые поры и шлаковые включения составляют вторую половину внутренних дефектов (50%) и могут существенно снижать качество и прочность сварного шва, нарушая целостность металла. Чтобы оценить влияние типов дефектов на прочность сварного соединения, из наиболее уязвимых участков труб были вырезаны образцы для испытаний на разрыв и загиб. Предварительный анализ полученных результатов показал, что поры снижают прочность сварных соединений на 17-21%, а шлаковые включения на 12-15%. Изменения формы и размеров сварного шва практически не влияют на прочность швов.

Литература:

1. Мигачева, Г.Н. Анализ причин брака монтажа магистральных трубопроводов / Г.Н. Мигачева, Д.В. Зыков // Сборник статей 4 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под научной редакцией Б.Н. Гузанова // Екатеринбург: РГППУ, 2017. - С. 117-122

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА



АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И РАБОЧЕГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Галив Н. В., Гридин С. В.

Донецкий национальный технический университет

Сравнительный анализ традиционных и современных решений по повышению долговечности и надежности оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) является важным элементом понимания направлений развития энергетических технологий. Долговечность и надежность оборудования напрямую влияют на эффективность работы станции, экономию ресурсов и безопасность эксплуатации, поэтому повышение надёжности и эксплуатационного ресурса оборудования ТЭС представляет собой важную задачу для обеспечения бесперебойной работы энергетических систем и повышения эффективности генерации электрической энергии. Этот процесс подразумевает применение различных технологий и методик, направленных на улучшение состояния и производительности оборудования, поэтому возникает необходимость выделить основные из них.

Надежность оборудования обычно определяется как способность выполнять заданные функции в течение определенного времени при соблюдении условий эксплуатации. Она включает в себя несколько ключевых понятий:

- функциональная надежность - способность оборудования выполнять определенные функции;
- долговечность - время, в течение которого оборудование может работать без существенных потерь в функциональности;
- безотказность - вероятность того, что оборудование будет работать без отказов в течение определенного времени.

Основные показатели надежности включают:

- среднее время наработки до отказа (среднее время работы оборудования между отказами);
- среднее время, необходимое для восстановления оборудования после отказа;
- уровень отказов - частота возникновения отказов в единицу времени.

При этом основными факторами, влияющими на надежность ТЭС, являются:

- качество материалов, использование высококачественных и сертифицированных материалов увеличивает срок службы и надежность оборудования;
- условия эксплуатации (температура, влажность, наличие агрессивной среды);
- регулярное техническое обслуживание (плановое обслуживание и контроль состояния оборудования), способствующее выявлению возможных неисправностей до их возникновения;
- современные технологии и системы автоматизации.

Одним из ключевых подходов к повышению надёжности оборудования ТЭС и продлению их сроков службы является внедрение современных методов диагностики и мониторинга состояния оборудования [1], позволяющих предсказать время, когда оборудование может выйти из строя, и провести ремонт заранее. Традиционными решениями являются обычные методы контроля состояния оборудования, такие как плановый осмотр и периодические испытания, что может привести к задержке в выявлении дефектов; полагание на опыт операторов, что иногда может быть связано с человеческим фактором.

К современным решениям следует отнести:

- вибродиагностика – метод, позволяющий своевременно выявлять такие механические неисправности, как нарушения балансировки и износ элементов оборудования, что способствует предотвращению их развития до критического состояния за счет выявления дефектов на ранних стадиях без разрушения оборудования;

- термография, применяется для диагностики перегрева элементов и узлов, что позволяет избежать аварийных ситуаций и продлить срок службы оборудования;

- акустическая эмиссия, используется для обнаружения трещин и других дефектов в конструктивных элементах оборудования, что также способствует повышению его надёжности.

Методы прогнозирования состояния оборудования [2], основанные на использовании аналитических и статистических моделей, позволяют планировать техническое обслуживание, что, в свою очередь, содействует предотвращению аварийных ситуаций. Основными из них являются:

- применение алгоритмов машинного обучения для анализа задокументированных данных о состоянии оборудования и выявления тенденций, что способствует реализации активного подхода в обслуживании;

- анализ потенциальных видов отказов оборудования и их последствий для оценки рисков и последствий возможных аварий на основе статистических методов. На основе полученных данных о состоянии оборудования строится гибкое изменение графиков обслуживания;

- определение жизненного цикла элементов и систем. Жизненный цикл оборудования состоит из нескольких этапов, начиная от проектирования и разработки и заканчивая демонтажом. Каждому из этих этапов присущи специфические риски, которые влияют на надёжность.

Модернизация устаревшего оборудования также играет важную роль в повышении его надёжности и эксплуатационных характеристик. Основные направления модернизации включают:

- замена устаревших компонентов на их современные аналоги путем использования высококачественных и более надёжных материалов и технологий способствует снижению вероятности отказов и увеличению срока службы оборудования. Применение современных материалов и технологий в конструкции оборудования помогает значительно увеличить его эксплуатационный ресурс. Примеры таких решений включают использование

новых типов покрытий, устойчивых к коррозии и абразивному износу, что позволяет защитить металлические части машин и агрегатов, а также добавочные технологии 3D-печати компонентов, что позволяет производить запчасти с высокой степенью точности и за более короткие сроки, а также облегчает процесс их замены и ремонта;

- внедрение современных систем цифровизации и автоматизации процессов управления и сбора данных позволяет повысить точность и устойчивость работы оборудования, сводя к минимуму человеческий фактор. Человеческие ошибки могут возникать на этапе анализа ситуации и принятия решений, если работники не могут правильно оценить ситуацию. Это может быть вызвано нехваткой информации, неясностью в инструкциях или просто недостатком опыта. При этом системы цифровизации и автоматизации позволяют осуществлять удалённый контроль, отслеживать параметры работы оборудования в реальном времени и отправлять данные для анализа, что значительно упрощает процессы управления и мониторинг состояния оборудования ТЭС.

Эффективная организация технического обслуживания значительно влияет на эксплуатационную надёжность оборудования ТЭС [3, 4]. Эти подходы направлены на минимизацию простоя оборудования, оптимизацию ресурсов и увеличение срока службы техники. К сожалению, традиционные подходы порой не учитывают индивидуальные особенности каждого конкретного объекта. Поэтому всё больше внимание уделяется:

- внедрению систем управления техническим обслуживанием, которые собирают и анализируют данные о состоянии оборудования, что помогает находить оптимальные интервалы для проведения сервисного обслуживания;

- переходу от ремонта по мере необходимости к подходу прогнозирования и предотвращения неисправностей обеспечивает более высокий уровень надёжности.

Не меньшую роль в обеспечении надёжности оборудования ТЭС играют квалификация и подготовка обслуживающего персонала. Человеческий фактор может быть как положительным, так и отрицательным, и его влияние проявляется во множестве аспектов. Настройки, требующие глубокого понимания оборудования и новейших технологий, лучше всего выполнять специалистами, прошедшими специальную подготовку, поэтому важно проводить регулярные тренинги и курсы повышения квалификации, чтобы сотрудники были в курсе последних технологических достижений и могли применять их на практике. Для обучения и повышения квалификации персонала необходимы:

- создание эффективных образовательных программ, направленных на повышение квалификации специалистов в области эксплуатации и ремонта оборудования ТЭС, что способствует уменьшению вероятности ошибок и повышению уровня эксплуатации оборудования;

- мотивация сотрудников, программы их поощрения и создание благоприятной рабочей атмосферы, способствующих повышению уровня

надежности оборудования, поскольку мотивированные сотрудники чаще проявляют инициативу и усиливают внимание к своим обязанностям;

- проведение регулярных учебных занятий и тренингов работников с целью отработки навыков, связанных с диагностикой и устранением неисправностей, что также непосредственно влияет на уровень надёжности работы оборудования ТЭС.

Надёжность и эксплуатационный ресурс оборудования также можно повышать за счет более эффективного использования природных ресурсов и минимизации выбросов, негативно сказывающихся на эффективности работы и репутации предприятия. Внедрение систем очистки выбросов (фильтры, абсорберы и т.п.) и энергоэффективных технологий позволяет не только снижать негативное воздействие на окружающую среду, но и повышает общую эффективность производственных процессов в целом.

Таким образом, повышение надёжности и эксплуатационного ресурса оборудования ТЭС — это сложный и разносторонний процесс, требующий комплексного подхода и применения современных технологий. Комбинирование технологических решений с пониманием и улучшением аспектов человеческого поведения является ключом к достижению высокой надёжности и безопасности работы оборудования ТЭС. При этом все перечисленные выше методы от диагностики и прогнозирования до обучения сотрудников и использования новейших материалов способны значительно улучшить эффективность и надёжность работы тепловых электростанций. В результате это не только обеспечит бесперебойную генерацию электроэнергии, но и будет способствовать устойчивому развитию энергетического сектора.

Литература:

1. Гридин, С. В. Анализ методов диагностирования трубопроводов тепловых сетей для определения их фактического технического состояния / Гридин С. В., Бирюков А. Б. // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 2. - С. 69-79.

2. Бирюков, А. Б. Моделирование и прогнозирование потребления тепловой энергии с использованием погодных данных / А. Б. Бирюков, С. В. Гридин//Информатика и кибернетика. - Донецк: ДонНТУ, 2024. - №1(35). - С. 5-16.

3. Галив, Н. С., Гридин С. В. Разработка предложений по продлению эксплуатационного ресурса паропроводов ТЭС // Металлургия XXI столетия глазами молодых/ Материалы IX Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов. – Донецк: ДОННТУ, 2024. – С. 162-165.

4. Макаров И. С., Безбородов Д. Л., Гридин С. В. Повышение эффективности работы конденсаторов паровых турбин // Металлургия XXI столетия глазами молодых/ Материалы III Международной научно-практической конференции студентов. – Донецк: ДОННТУ, 2017. – С. 200-202.

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВАРИЙНО-УСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА

Новичков Р.С., Гридин С. В.

Донецкий национальный технический университет

Система газоснабжения города – это совокупность источника газа, различных по своим характеристикам газопроводов, газораспределительных станций и резервуаров-хранилищ газа [1].

Газоснабжение играет важную роль в обеспечении энергетической безопасности и комфорта жизни населения. Однако, учитывая потенциальные риски, связанные с эксплуатацией газовых систем, создание аварийно-устойчивой системы становится необходимым для предотвращения рабочих инцидентов и минимизации последствий аварий. Кроме того, в ходе проведения СВО все больше временно оккупированных населенных пунктов ДНР практически ежедневно переходит под контроль российских войск, и первоочередной задачей республики становится налаживание систем жизнеобеспечения населения в них. Большинство поселений представляют собой шахтные поселки на 5000 и более жителей, где вся инфраструктура была на балансе работающих шахт, заводов и др. промышленных предприятий. Инфраструктура практически полностью разрушена и зачастую не подлежит восстановлению.

При разрушении элементов системы газоснабжения кроме нарушения технологических процессов появляется огромная опасность возникновения пожаров, взрывов, загазованности местности, что может значительно усложнить работу спасателей и восстановительные работы. Поэтому основной особенностью систем газоснабжения является их надежность - свойство сохранять во времени в установленных пределах пропускную способность, мощность, давление, расход газа и др., характеризующие способность транспортировать потребителям необходимые количества газа с соблюдением заданных режимов при нормальных условиях эксплуатации, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования в течение определенного периода времени [1].

Другой отличительной особенностью систем газоснабжения (как и теплоснабжения) является их социальный характер, так как они обслуживают людей и обеспечивают их нормальную жизнедеятельность. При аварийных отказах и прекращении подачи газа потребителям имеет место не только экономический, но и моральный ущерб.

Поэтому возникает необходимость в проектировании аварийно-устойчивой системы газоснабжения и разработке мероприятий по организации системы стабильного и безопасного газоснабжения населенных пунктов республики, инфраструктура жизнеобеспечения которых пострадала от ведения военных действий, для обеспечения потребления газа на бытовые,

коммунальные и общественные нужды поселка.

Рассмотрим базовые понятия аварийно-устойчивой системы газоснабжения, методы её проектирования и критерии, которые необходимо учитывать при её создании [2].

Под устойчивостью функционирования систем газоснабжения понимают выполнение ею плана своего развития с допустимыми отклонениями по объёмам и временам выполнения задач [1].

Аварийно-устойчивая система газоснабжения представляет собой комплекс мероприятий и технологий, которые позволяют обеспечить бесперебойное и безопасное газоснабжение в условиях потенциальных аварийных ситуаций. Основные компоненты аварийной устойчивости включают в себя:

- определение риска (оценка вероятности и последствий аварийных ситуаций);
- системы контроля и управления (автоматизация процессов для быстрого реагирования на нештатные ситуации);
- физические меры (использование устройств и материалов, способствующих снижению воздействия аварий).

Методы проектирования аварийно-устойчивых систем газоснабжения можно разделить на несколько категорий: а) методы вероятностного анализа (применяются для оценки рисков и вероятностей возникновения аварийных ситуаций); моделирование и симуляция (использование специализированных программ для прогнозирования поведения системы газоснабжения в различных сценариях), экспертные оценки с привлечением специалистов для определения критических точек и уязвимостей системы газоснабжения.

Вероятностный анализ позволяет оценить возможность возникновения аварий на основе статистических данных. Этот метод включает в себя использование расчетных формул:

$$P(A)=N(A)/N, \quad (1)$$

где $P(A)$ - вероятность события A , $N(A)$ - количество случаев, когда событие A произошло, N - общее число наблюдений.

При моделировании ситуаций с помощью программного обеспечения можно смоделировать поведение системы при различных условиях, что позволяет определить критические моменты и уязвимости системы газоснабжения, оптимизировав проект на ранних этапах.

Использование опыта, знаний и экспертных оценок специалистов по газоснабжению позволяет выявить важные аспекты, которые могут не быть отражены в статистических данных или моделировании.

Среди существующих методов разработки критериев для проектирования аварийно-устойчивой системы газоснабжения можно выделить:

- метод анализа последствий, который позволяет сфокусироваться на возможных последствиях аварий для здоровья населения и окружающей среды, в том числе на оценке возможных сценариев при утечках газа;

- метод структурного анализа, применяемый для изучения проектирования газопроводов с учетом внешних и внутренних нагрузок, широко применяемый в европейских странах для проектирования устойчивых к внешним воздействиям газопроводов;

- метод качественной оценки риска с целью определения и оценки рисков, связанных с проектированием и эксплуатацией системы газоснабжения, активно используется в том числе для разработки нормативных документов и стандартов по безопасности газоснабжения.

На основе вышеизложенного можно выделить три наиболее точных метода разработки критериев для проектирования аварийно-устойчивой системы газоснабжения:

- вероятностный анализ с использованием статистических данных, позволяющий выдвигать обоснованные предположения на основе реальных данных и статистики;

- моделирование на базе симуляционных технологий, предоставляет возможность выявить уязвимости и протестировать различные сценарии;

- включение экспертных оценок в процесс проектирования, при этом опыт специалистов может обеспечить качественное улучшение проектных решений.

В качестве основных критериев аварийно-устойчивой системы газоснабжения предлагается использовать:

- высокий уровень надёжности, определяющий структурное резервирование принципиальной схемы. Основным критерием надёжности для невосстанавливаемых систем является вероятность безотказной работы в течение заданного времени $p(t)=1-\int f(t)dt$, $f(t)$ – частота отказов как отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются);

- коэффициент надежности K_c (опасность возникновения утечек с учетом вероятности безотказной работы в течение заданного времени);

- резерв мощности (пропускной способности), определяемый лимитом подачи газа в аварийных ситуациях. Он обосновывается из анализа потребителей и устанавливает допустимый лимит газа, который подаётся всем потребителям при наиболее напряжённых гидравлических режимах;

- ремонтпригодность: система должна быть приспособлена к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путём проведения технического обслуживания и ремонтов. Основным показателем ремонтпригодности системы газоснабжения является время восстановления отказавшего элемента τ_v (среднее время восстановления отказавшего элемента $\tau_v = (\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n) / n$);

- интенсивность p_i потока отказов k_i за год на участке газовой сети (в настоящее время средняя интенсивность аварий на магистральных газопроводах составляет $0,2 \cdot 10^{-3}$ аварий/км·год). Определение остаточного ресурса и срока службы газовых сетей на основе показателя потока отказов выглядит более достоверным, поэтому конечные результаты технической

диагностики наиболее рационально представлять через этот показатель или коэффициенты, равнозначные с ним;

- устойчивость в условиях чрезвычайных ситуаций (коэффициент аварийно-опасности λ).

Коэффициент аварийно-опасности λ рассчитывается по формуле:

$$\lambda = (4\sum L_k + 1,7\sum L_{dk} + 0,15(L - \sum L_k - \sum L_{dk})) / L, \quad (2)$$

где: $\sum L_k$ - сумма длин интервалов для критических дефектов,

$\sum L_{dk}$ - сумма длин интервалов для докритических дефектов,

L - длина участка по трубе, м.

Критерием для оценки допустимости дальнейшей эксплуатации газопровода является сравнение λ с его пороговым значением λ_k , определяющимся через условный проход трубы D_y , мм, по формуле:

$$\lambda_k = 25 \cdot 10^{-8} \cdot (D_y)^2 - 7,4 \cdot 10^{-4} (D_y) + 1,26. \quad (3)$$

При $\lambda < 0,8\lambda_k$ техническое состояние газопровода признается работоспособным (проектный рабочий ресурс), при $0,8\lambda_k < \lambda < \lambda_k$ - с ограниченным рабочим ресурсом (допускается дальнейшая эксплуатация в течение 1-2-х лет без профилактического ремонта), при $\lambda > \lambda_k$ - неработоспособным (в ветхом состоянии, из-за опасности образования течей требуется проведение капитального ремонта с перекладкой).

Система должна обеспечивать газоснабжение объектов экономики и населения в установленном объёме в условиях потерь и разрушений, а также в минимально короткие сроки восстанавливать поставки газа потребителям до заданных уровней.

Для повышения устойчивого и безаварийного газоснабжения необходимо внедрять такие мероприятия по повышению устойчивого и безаварийного газоснабжения, как: регулярные проверки и техническое обслуживание газового оборудования; внедрение системы автоматического контроля и мониторинга за состоянием газопроводов; обучение пользователей и специалистов по безопасной эксплуатации газового оборудования; разработка и внедрение новых технологий для выявления утечек газа; стимулирование инвестиций в модернизацию устаревших газотранспортных систем.

Таким образом, создание аварийно-устойчивой системы газоснабжения населенного пункта требует комплексного подхода, включающего вероятностный анализ, моделирование и экспертные оценки. Применение предложенных мероприятий позволит существенно повысить уровень безопасности и надежности системы газоснабжения.

Литература:

1. Ионин, А. А. Газоснабжение. М.: – 1989. – 434 с.
2. Гридин, С.В. Анализ перспектив и методов использования газогенераторного газа с целью разработки энергоэффективных решений по экономии энергоресурсов / С.В. Гридин, С.А. Вертела // Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит. – 2013. – №8(114). – С.31-40.

АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Толстошеев С. В., Гридин С. В.

Донецкий национальный технический университет

Системы теплоснабжения играют ключевую роль в поддержании комфортной температуры в жилых и коммерческих зданиях, а эффективность их работы во многом зависит от характеристик запорной и регулирующей арматуры (ЗРА). ЗРА в системах теплоснабжения должна обеспечивать герметичность для предотвращения утечек теплоносителя из-за старения материалов; возможность точной настройки (регулируемость) потока теплоносителя; защиту от коррозии материалов под воздействием воды, содержащей кислоты и соли, и износостойкость при механическом износе уплотнительных и подвижных частей из-за многократных циклов открывания и закрывания.

Одним из основных требований, предъявляемых к арматуре, является её надёжность, так как большинство аварий в элементах систем теплоснабжения связаны с отказом ЗРА, вызванных потерей герметичности между разъемными соединениями оборудования, дефектами деталей, коррозией металла. Арматура, обеспечивающая управление потоком теплоносителя, подвергается значительным эксплуатационным нагрузкам, что может приводить к ухудшению её характеристик со временем.

Таким образом, особую актуальность при выработке подходов к повышению показателей работы систем теплоснабжения приобретает вопрос анализа фактических эксплуатационных характеристик ЗРА, который позволяет определить преимущества и недостатки различных видов арматуры, их энергоэффективность на заданных участках тепловых сетей и трубопроводов, а также надёжность при эксплуатации.

Большая часть трубопроводной арматуры многих предприятий теплоснабжения региона имеет срок эксплуатации более тридцати лет и поэтому существенно исчерпала свой эксплуатационный ресурс.

В целом по РФ срок службы более 30 лет имеют 45% сетей, от 25 до 30 лет – 25%, и лишь 30% имеют срок службы менее 25 лет. В 2020 г. произошло 3693 аварии, в 2021 г. - 4176; в 2022 г. - 3661 [1]. В настоящее время количество повреждений на 1 км трубопровода (удельная повреждаемость) по стране составляет 0,022 [1]. При этом средняя удельная повреждаемость трубопроводов тепловых и паровых сетей имеет тенденцию к снижению в сравнении с 2000 г. (1,79, в 80 раз больше, чем в 2022 г.). По данным системы мониторинга и контроля устранения аварий и инцидентов на объектах ЖКХ РФ в городе с населением около 100000 жителей в среднем в год происходит около 300 инцидентов, связанных с повреждениями или авариями. Усредненная стоимость ликвидации одного повреждения составляет около 40 тыс.руб, с

учетом 44 млн. абонентов нетрудно оценить общую сумму, в которую обходятся ремонтные работы в масштабах всей страны.

Поэтому для своевременного определения мест дефектов и утечек в тепловых сетях нужно периодически проводить мероприятия по технической диагностике теплопроводов. Такой подход позволяет решить проблемы повышения эксплуатационной надежности теплопроводов и их безотказности, долговечности, ремонтпригодности и продления срока службы на основании комплексного учета многих факторов.

Анализ статистики по опыту внедрения методов диагностики на предприятиях тепловых сетей показывает, что ряд из них имеет ограничения по применению, связанные с доступностью к местам контроля, с качеством контролируемой поверхности, с сезонностью проведения диагностики, а также с недостаточностью апробации методов.

Таким образом, техническая диагностика должна проводиться наиболее подходящими по условиям эксплуатации и дающими достоверный результат методами, что позволит формализовать выбор очередности участков тепловых сетей при составлении планов реконструкции и капитального ремонта.

При этом для арматуры трубопроводов допустимыми являются только неразрушающие методы контроля (радиационный и электромагнитно-акустический ультразвуковой контроль, методы визуально-измерительного контроля, акустического резонанса и магнитной памяти металла), с помощью которых определить все требуемые для анализа механические свойства металла корпуса невозможно. В этом случае прибегают к методу сравнения, используя для отбора проб металла корпуса подобные изделия, ранее выведенные из эксплуатации.

В целом, к основным методам определения фактических характеристик относятся, прежде всего, визуальный осмотр, позволяющий выявить видимые признаки коррозии и механических повреждений. Этот метод прост, однако не всегда достаточен для комплексного анализа.

Гидравлические испытания (опрессовка) на герметичность и прочность ЗРА и трубопроводов повышенным давлением рекомендуется проводить ежегодно перед началом отопительного периода с целью разрушения слабых мест трубопроводов с толщиной стенки до 1 мм. Критерием для определения достаточных значений фактической толщины стенки трубы является её допустимая толщина (не менее 80% от проектной толщины), при которой возможна работа теплопровода на расчетных параметрах в течение расчетного ресурса. Трубопровод и ЗРА считают выдержавшими испытание, если не будут обнаружены течи, потение в сварных соединениях и в металле труб, видимые остаточные деформации, трещины или признаки разрыва, падение давления по манометру.

Например, в одной из теплоснабжающих компаний [2] был внедрён комплексный подход: после анализа состояния арматуры с помощью визуальных осмотров и гидравлических испытаний, компания решила заменить 15% отфильтрованных запорных вентилей, что позволило улучшить параметры

теплообмена на 20%.

Проведение гидравлических испытаний на герметичность и прочность трубопроводов и ЗРА под давлением позволяет получить точные данные о состоянии запорной арматуры. Так, по результатам обследований арматуры, установленной более 20 лет назад [2], было отмечено уменьшение герметичности у 30% арматуры и снижение регулирующей способности ЗРА до 50% от первоначальных значений.

Современные технологии, такие как интеллектуальные системы мониторинга, позволяют в реальном времени отслеживать параметры работы арматуры и определять износ. Например, система может измерять давление и температуру теплоносителя и автоматически информировать о необходимости технического обслуживания.

Основным показателем эффективности эксплуатации ЗРА тепловых сетей является их удельная повреждаемость $n_c = N_c / M_c$, шт./м² как отношение количества повреждений за год N_c на 1 м² материальной характеристики трубопроводов сети M_c , просуммированной по всей сети в целом, м²:

$$M_c = \sum_c (d_n L), \quad (1)$$

где d_n — наружный диаметр труб в пределах одного участка сети (по подающей или обратной линии при равных диаметрах труб), м;

L — протяженность участка сети, м.

Повреждаемость n_c зависит от срока эксплуатации оборудования, условий прокладки трубопроводов, уровня давления в тепловой сети, качества сетевой воды, соответствия производительности химической водоподготовки и способа обработки подпиточной воды.

Структура общей повреждаемости характеризуется удельными показателями:

а) по месту возникновения повреждений: трубопроводы — $n_{tc} = N_{tc} / M_c$, шт./м²; арматура — $n_{ac} = N_{ac} / M_c$, шт./м²;

б) по причинам повреждения: наружная коррозия — $n_{nc} = N_{nc} / M_c$, шт./м² (состояние арматуры, прокладок и каналов); внутренняя коррозия — $n_{vc} = N_{vc} / M_c$, шт./м² (качество обработки подпиточной воды);

в) по условиям возникновения повреждений: в период эксплуатации — $n_{эc} = N_{эc} / M_c$, шт./м²; при опрессовках — $n_{oc} = N_{oc} / M_c$, шт./м².

Значение удельной повреждаемости n_c рассчитывается по формуле:

$$n_c = \frac{N_{tc} + N_{ac} + N_{nc} + N_{vc} + N_{эc} + N_{oc}}{M_c} = n_{tc} + n_{ac} + n_{nc} + n_{vc} + n_{эc} + n_{oc}. \quad (2)$$

К основным неисправностям ЗРА относят следующие: рабочая среда протекает, несмотря на полностью опущенный запорный орган вследствие износа уплотнительных поверхностей корпуса; через сальник протекает рабочая среда вследствие недостаточно плотно набитого сальника; запорный орган перемещается со значительными задержками из-за износа направляющих клиньев или повреждения трапецеидальной резьбы в резьбовой втулке или шпинделе; срабатывание предохранительного клапана при нормальный

условиях эксплуатации из-за нарушения герметичности в импульсном клапане; в гидравлической характеристике регулирующего клапана наблюдаются изменения вследствие его эрозионного износа, невозможно переместить запорный орган в любом из направлений после выхода из строя детали или группы деталей привода управления (ходовой гайки, шпинделя и др.) и т.п..

Все указанные выше мероприятия позволяют провести комплексный анализ состояния ЗРА и сформулировать перечень основных подходов к повышению показателей работы систем теплоснабжения [3].

1. Модернизация арматуры, в том числе замена старой арматуры на современную с улучшенными характеристиками (например, с антикоррозионным покрытием).

2. Повышение качества материалов за счет использования новых сплавов и полимеров, устойчивых к коррозии, позволяющее продлить срок службы арматуры и снизить риски её поломки.

3. Систематическое техническое обслуживание ЗРА - регулярные проверки и диагностические мероприятия, включая запланированные ревизии, для своевременного выявления и устранения проблем в ходе эксплуатации.

4. Внедрение современных технологий управления при использовании автоматизированных систем управления для оптимизации потока теплоносителя, снижения температуры в системе и уменьшения энергозатрат.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что поддержание надлежащего состояния арматуры и внедрение современных технологий являются ключевыми шагами для повышения эффективности систем теплоснабжения, поскольку их функционирование напрямую зависит от качественного состояния ЗРА. Такие подходы, как регулярный анализ, модернизация и внедрение современных технологий управления могут привести к улучшению фактических характеристик ЗРА и, как следствие, к улучшению показателей эффективного функционирования систем теплоснабжения.

Литература:

1. Долотов А. М., Зацарный В. А. Системный подход к определению энергоэффективности трубопроводной арматуры // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 2. – С. 66–74. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23599009_82115304.pdf

2. Королева, Ю.А. Изучение характеристик регулирующей арматуры водяных тепловых сетей // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018007696>

3. Гридин, С. В. Анализ методов диагностирования трубопроводов тепловых сетей для определения их фактического технического состояния / Гридин С. В., Бирюков А. Б. // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 2. - С. 69-79.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Калмыков И.Л., Гридин С. В.

Донецкий национальный технический университет

Тепловые сети представляют собой сложные инженерные системы, которые требуют постоянного контроля и модернизации для обеспечения эффективной работы [1]. С увеличением потребностей в энергоресурсах и усиливающейся конкуренции на рынке энергетики внедрение новых технологий и материалов становится необходимым для повышения общей эффективности систем теплоснабжения. Однако, теплоизоляция трубопроводов тепловых сетей часто недостаточная и приводит к значительным тепловым потерям, что увеличивает затраты на отопление - тепловые потери через трубопроводы являются одной из значительных статей расходов, что делает задачу их снижения крайне важной.

Система теплоснабжения, основанная на тепловых сетях, играет основную роль в обеспечении надежности и эффективности теплообмена в городах и населенных пунктах. Одной из главных задач, стоящих перед специалистами в данной области, является снижение тепловых потерь через теплоизоляционные материалы и конструкции трубопроводов, поэтому необходимо рассмотреть современные подходы к замене теплоизоляционных материалов и конструкций, а также их влияние на снижение энергетических потерь в системах теплоснабжения.

Теплоизоляционные материалы (таблица 1)– это материалы, которые помогают снизить теплопотери, действуя как барьеры для передачи тепла. \

Таблица 1 – Сравнительная характеристика видов теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционный материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м°C	Плотность, кг/м ³	Диапазон рабочих температур, °C	Период эксплуатации, лет
Пенополиуретан	0,019-0,035	45-60	-200 +150	30-50
Минеральная вата	0,052-0,058	15-150	-40 +250	5-7
Пенобетон	0,145-0,160	250-400	-30 +120	10
Вспененный полиэтилен	0,038-0,042	20-40	-80 +100	До 30
Вспененный каучук	0,032-0,042	60-85	-70 +150	20-30
Пенополистирол	0,043-0,064	15-45	-80 +80	15

На рынке существует широкий выбор таких теплоизоляционных материалов (таблица 1):

- минераловатные плиты и маты, обладающие высокой теплоизоляцией и огнестойкостью;
- пенопласт и пенополистирол (легко укладываются, имеют низкую теплопроводность, но подвержены действию влаги);
- гибкие изоляционные материалы (эластомеры), устойчивые к влаге и повреждениям. Эластомеры подходят для трубопроводов с нестандартной конфигурацией и сложной геометрией. Они обеспечивают надежное уплотнение и защиту от влаги, что уменьшает вероятность коррозии труб. При этом, они могут быть дороже обычной минеральной или пенопластовой изоляции, также важно обеспечить их грамотный монтаж;
- вакуумные теплоизоляционные панели, обладают максимальной теплоизоляцией при минимальной толщине, но дорогостоящи и чувствительны к механическим повреждениям.

Каждый из этих материалов обладает своими характеристиками, такими как теплопроводность, устойчивость к внешним воздействиям, срок службы и стоимость. Важно отметить, что выбор подходящего материала должен основываться не только на его теплотехнических характеристиках, но и на условиях эксплуатации, что подразумевает учет местного климата, агрессивности среды и потенциальных механических повреждений.

Теплозащитные конструкции трубопроводов тепловых сетей характеризуются выбором теплоизоляции, защитным покрытием и монтажными технологиями, которые влияют на эксплуатационные характеристики и эффективность системы.

Проведенный в ходе исследований анализ вариантов замены теплоизоляционных материалов и конструкций [1] позволяет выделить несколько наиболее эффективных вариантов замены, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки:

- замена минеральной ваты на пенополистирол: Это решение предполагает использование более влагостойких и легких материалов. Хотя пенополистирол обладает лучшими теплоизоляционными характеристиками, его применение может привести к увеличению стоимости работ из-за необходимости в специальных технологиях монтажа;
- использование аэрогелей и вакуумных теплоизоляционных панелей, обеспечивающих высокую теплоизоляцию (имеют теплопроводность на уровне $0,007 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), но их стоимость может превышать стоимость традиционно используемых материалов. Этот вариант является высокоэффективным с точки зрения теплоизоляции, что делает его значительно более привлекательным по сравнению с применением традиционных материалов. Однако их высокая стоимость и необходимость в специализированной установке ограничивают широкое применение, даже несмотря на то, что более высокая энергоэффективность может оправдать начальные затраты в будущем;
- модернизация конструкций, включает в себя улучшение способов монтажа и защиты существующих трубопроводов от механических повреждений и влаги, что может значительно продлить срок службы теплоизоляции.

Проанализировав эти варианты, можно сделать вывод, что каждая из указанных технологий требует индивидуального подхода, учитывающего технические, экономические и эксплуатационные характеристики. В целом, замена устаревших теплоизоляционных систем на более современные и эффективные может значительно снизить тепловые потери. Исследования показывают, что даже небольшое снижение теплопроводности изоляционного материала влечет за собой значительное сокращение тепловых потерь.

Кроме того, необходимо учитывать поведение материалов при высоких температурах и возможное влияние на окружающую среду при утилизации. Такие переходы часто требуют тщательной оценки существующих условий эксплуатации и температуры транспортируемого теплоносителя.

Существует несколько подходов к снижению тепловых потерь в тепловых сетях:

- проведение тепловых обследований: регулярные аудиты систем позволяют выявлять проблемные зоны и планировать мероприятия по их устранению;
- использование новых технологий изоляции с применением высокоэффективных изоляционных материалов;
- модернизация теплотехнических конструкций: замена стальных труб на полиэтиленовые, которые имеют меньшую теплопроводность и большую стойкость к коррозии.

В качестве примеров внедрения мероприятий по снижению теплопотерь можно привести следующие:

1. Тепловое обследование: в результате аудита [2] было обнаружено, что 20% потерь связано с мостами тепловых сетей, проведенные работы по утеплению снизили тепловые потери на 15%.

2. На нескольких объектах тепловых сетей было принято решение о замене старых материалов более современными [2]. Замеры показали, что после замены перепад температур по трассе после теплоизоляции достаточно большого участка сетей значительно сократился, что указывает на снижение теплопотерь. Расчеты подтвердили достоверность данных обследований.

3. Тестирование замены минеральной ваты на пенополистирол для утепления участков износившихся трубопроводов показало, что новые материалы позволили снизить тепловые потери на 30%, при этом затраты на отопление снизились на 15% [2].

4. Замена труб при переходе на полиэтиленовые трубы увеличила срок эксплуатации тепловых сетей на 30%, снижая теплопотери на 10% [1].

Для анализа эффективности замены теплоизоляционных материалов применяются различные методы. Одним из наиболее распространенных является расчет годовых тепловых потерь с использованием формулы:

$$Q = k S \cdot \Delta T \cdot t,$$

где Q - годовые теплопотери, k - коэффициент теплопередачи, S - площадь поверхности, ΔT - разность температур между теплоносителем и окружающей средой, t - время. Подбор оптимальных режимов работы системы и новых

материалов позволяет существенно снизить значение Q , что прямым образом влияет на экономию затрат.

Также для оценки эффективности замены теплоизоляционных материалов необходимо проводить теплотехнические расчеты, позволяющие определить коэффициент теплопроводности λ , который напрямую влияет на тепловые потери, и оценить затраты на замену материала с точки зрения потенциальной экономии E на затратах на отопление. Экономия может быть рассчитана по формуле:

$$E=Q_{\text{ст}}-Q_{\text{н}},$$

где $Q_{\text{ст}}$ и $Q_{\text{н}}$ — тепловые потери до и после замены теплоизоляции.

На основании проведенного анализа можно выделить три наиболее эффективные мероприятия по снижению теплопотерь в тепловых сетях [1, 2]:

- регулярное проведение тепловых обследований и их последующий анализ, что позволяет оперативно устранять проблемы и предотвращать их возникновение.
- полная замена старых трубопроводов на современные композитные материалы, что обеспечивает долговечность и устойчивость к внешним воздействиям.

- переход на вакуумные теплоизоляционные панели, что позволяет значительно сократить тепловые потери и повысить энергоэффективность.

Таким образом, исследование эффективности замены теплоизоляционных материалов и конструкций для снижения тепловых потерь в тепловых сетях является важной темой на современном этапе развития энергетических технологий [1 - 3]. С учетом постоянно растущих требований к надежности и эффективности систем теплоснабжения необходимо продолжать научные исследования в этой области, направленные на оптимизацию существующих решений и внедрение инновационных технологий. Это позволит не только снизить эксплуатационные расходы, но и значительно повысить энергоэффективность работы тепловых сетей и повысить устойчивость жизнедеятельности городских инфраструктур, что в итоге приведет к улучшению общей социальной и экологической обстановки.

Литература:

1. Гридин, С. В. Критерий оценки эффективного функционирования тепловой сети / Гридин, С. В., Бирюков, А. Б. // Энергетические системы - Белгород : ФГБОУ БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024, т. 9 вып. № 1 (003). С. 22-33.

2. Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии : монография / А. Б. Бирюков, П. А. Гнитиёв, А. Н. Лебедев, С. В. Гридин : ФГБОУ ВО "ДонНТУ". - Донецк : ИП Криничная И.В. 2024. - 343 с.

3. Гридин, С. В. Анализ методов диагностирования трубопроводов тепловых сетей для определения их фактического технического состояния / Гридин С. В., Бирюков А. Б. // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. — 2024. — № 2. - С. 69-79.

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКА 200 МВт И СНИЖЕНИЮ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Гулов К. К., Гридин С. В.

Донецкий национальный технический университет

Существующие тепловые электростанции (ТЭС) играют основную роль в обеспечении энергетической безопасности и стабильности электроэнергетических систем. Однако использование традиционных ископаемых видов топлива, таких как уголь и природный газ, приводит к значительным объемам вредных выбросов парниковых газов и других вредных веществ (углекислый газ CO_2 , оксиды азота NO_x , диоксид серы SO_2 и твердые частицы). Снижение этих выбросов имеет решающее значение для улучшения качества воздуха и уменьшения влияния на климатические изменения. Поэтому разработать мероприятия по повышению энергоэффективности блока мощностью 200 МВт ТЭС невозможно без решения вопросов, связанных со снижением вредных выбросов и повышением общей экологической устойчивости ТЭС.

В общем случае энергоэффективность определяется как соотношение полученной полезной энергии к затраченным ресурсам (топливо, электроэнергия), но конкретно в ситуации с ТЭС это понятие должно включать в себя оптимизацию процессов сгорания, использование высокоэффективных технологий и автоматизацию управления.

Основной проблемой существующих ТЭС региона является низкий термический КПД цикла Ренкина, обуславливающий достаточно низкое значение КПД всего цикла генерации - 35-40%. Это связано, прежде всего, с передачей больших количеств теплоты от конденсирующегося пара охлаждающей воды в конденсаторе, а от нее в окружающую среду [1]. С термодинамической точки зрения наиболее подходящим способом повышения эффективности генерации электрической энергии при использовании органического топлива является использование бинарных циклов на парогазовых станциях, при этом термический КПД достигает 60% и более.

Интересным и перспективным способом улучшения технико-экономических характеристик выработки электроэнергии при использовании твердого топлива является использование технологии сжигания низкосортного высокозольного угля в циркулирующем кипящем слое.

Анализ существующих методов повышения энергоэффективности блоков тепловых электростанций показал, что из существующих технологий и методов основными являются:

- модернизация котлов с использованием технологий когенерации и тригенерации позволяет максимально использовать полученную теплоту (устаревшие котлы часто работают с низким КПД, современные котлы, такие

как с кипящим или циркулирующим слоем, способны обеспечить более полное сгорание топлива);

- установка систем очистки выбросов, таких как системы десульфурации и селективного каталитического восстановления, значительно снижающих выбросы NO_x и SO_2 . Так, инвестиции в системы фильтрации (электрофильтры и системы мокрой очистки), существенно снижают уровень твердых частиц и других вредных веществ до уровня соответствия современным экологическим нормам;

- использование систем утилизации тепла, повышающих общую эффективность за счет повторного использования теплоты отходящих газов и теплоносителей для подогрева воды или воздуха;

- внедрение технологий улавливания и хранения углерода;

- внедрение систем смешанной генерации на основе комбинации традиционных источников энергии с более чистыми источниками энергии (солнечные или ветряные), позволяющих снизить уровень вредных выбросов. Включение солнечных панелей и ветряных турбин в систему ТЭС может уменьшить зависимость от ископаемых видов топлива, тем самым снижая выбросы CO_2 . Использование гибридных систем, которые комбинируют традиционное производство электроэнергии и возобновляемые источники, позволяет повысить общий КПД электростанции.

Внедрение данных мероприятий уже показало свою эффективность на ряде ТЭС. Так, модернизация существующего оборудования за счет установки газотурбинных установок рядом с паровыми позволила повысить общий КПД блоков более чем на 15%. В другом случае модернизация котлов с использованием технологии глубокого сгорания угля привела к повышению КПД блока с 34% до 42%, что соответствует снижению выбросов CO_2 на 20%. На одной из ТЭС Китая проведенная интеграция солнечных модулей на градирнях тепловых электростанций в качестве вспомогательной системы выработки электроэнергии на тепловой электростанции позволила снизить потребление угля на 15% в летние месяцы, когда солнечной энергии достаточно для покрытия пиковых нагрузок.

Особый интерес вызывает реконструкция, выполненная на одной из ТЭС региона, основным источником выделения загрязняющих веществ в атмосферу на которой являлись устаревшие котлоагрегаты.

Анализ современной технологии сжигания угля показал, что реконструкция энергоблоков разной мощности и режима нагрузки под разные угли возможна по нескольким вариантам:

- поузловая реконструкция котлоагрегатов (при зольности до 24%);
- реконструкция котлоагрегатов с установкой плавильных предтопок (целесообразна при зольности до 30%);
- установка котлоагрегатов с арочными топками (при зольности до 30%);
- установка котлоагрегатов с атмосферным циркулирующим кипящим слоем (АЦКС);
- установка котлоагрегатов с кипящим слоем под давлением (КОД).

При реконструкции пылеугольных котлоагрегатов были решены следующие основные задачи: обеспечение эффективного сжигания высокозольных углей без стабилизирующей газомазутной подсветки; повышение маневренности; существенное снижение выбросов NO_x , SO_2 , пыли (до уровня мировых стандартов).

Основной причиной снижения механического недожога на реконструируемых котлах является выделение летучих веществ из топлива до попадания ПУТ в топочное пространство котла, выделение энергии от сжигания которых в топке котла ускоряет выделение оставшейся части летучих веществ, прогрев частицы и ее воспламенение, то есть приводит к уменьшению времени задержки воспламенения. Существенное снижение механического недожога при сжигании ПУТ в топках энергетических котлов наблюдается при обеспечении предварительного теплового контакта горячего первичного воздуха и пыли из АПП.

Установка котла АЦКШ, оснащенного высокоэффективным электрофильтром, позволила снизить величину валовых выбросов в атмосферу по сравнению с выбросами от существующего котлоагрегата: NO_x - в 5,47 раза, SO_2 - в 12,8 раза, пыли неорганической с содержанием SiO_2 - в 58,6 раза. Замена одного существующего котла ТП-100 на котел АЦКШ, включая все сопутствующие источники выбросов, дала снижение максимальных приземных концентраций на границе санитарно - защищенной зоны: NO_x - в 3 раза, SO_2 - в 5 раз, пыли неорганической - в 44 раза, по группе суммации №31 - 3,6 раза. При этом уровень суммарного загрязнения атмосферы в зоне влияния ТЭС после реконструкции энергоблока уменьшились на: NO_2 - 11-25%, SO_2 - 11-30%, пыли - 12-28%.

Технология сжигания твердого топлива в котлах АЦКШ позволила в самом технологическом процессе снизить образование оксидов серы, оксиды азота практически не выделяются в последствии низкой температуры в топке. Установка высокоэффективного пылеулавливаемого оборудования обеспечивает эффективность очистки от твердых частиц на 99,997% при остаточной запыленности газов 50 мг/м^3 , что в 60 раз меньше существующего ранее уровня.

Установка котла АЦКШ позволила:

- впервые внедрить в энергетику региона высокоэффективную экологически чистую технологию;
- использовать для сжигания низкосортное топливо, в том числе и отходы, не использовавшиеся ранее, углеобогащение (шламы);
- экономить дорогостоящее топливо (газ, мазут);
- увеличить мощность блока №4 с 175 до 210 МВт и тем самым увеличить срок службы блока на 25 лет, снизить себестоимость электроэнергии и ее затраты на собственные нужды, увеличить отпуск электроэнергии потребителям;
- ликвидировать шламоотстойники и шламоотвалы;

- существенно улучшить экологическую ситуацию в районе за счет уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу;
- решить социальные проблемы (занятость населения, рост благосостояния и т.п.).

В качестве рекомендации для реконструкции котлов типа ТП-100, работающих на низкореакционном топливе, в условиях других ТЭС можно предложить следующие мероприятия:

1) замена двухулиточных пылегазовых горелок, выполненных по проекту СКБ ВТИ, на улиточно-лопаточные двухканальные по вторичному воздуху, которые максимально соответствуют требованиям отраслевого стандарта ОСТ 108.030.26–78;

2) изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации путём переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла;

3) замена обычных щелевых топок на газоплотные.

Выполнение этих мероприятий приведёт к снижению удельного расхода топлива на производство электрической энергии за счет:

- снижения содержания горючих в уносе предположительно до 10%;
- снижения расхода природного газа на подсветку факела и эффективность сжигания совместно в одной горелке два вида топлива, основного – твердого топлива (угольная пыль) и подсветочного – природного газа либо мазута;
- снижения присосов холодного воздуха в топку котла до 5%;
- снижение потерь теплоты с уходящими газами.
- повышение КПД блока приведет к снижению затрат на топливо и уменьшению связанных с этим расходов;
- снижение уровней вредных выбросов будет способствовать улучшению качества воздуха и, соответственно, состоянию здоровья населения;

Кроме того, применение современных технологий позволит обеспечить соблюдение всех необходимых экологических требований и норм.

Таким образом, повышение энергоэффективности блока 200 МВт ТЭС является важной задачей для обеспечения устойчивого и экологически чистого производства электроэнергии. Внедрение современных технологий и мероприятий позволит не только снизить вредные выбросы, но и повысить экономическую отдачу от работы тепловых электростанций и общую производительность станции. Необходимо активное сотрудничество всех заинтересованных сторон, включая правительство, научные организации и индустрию, для достижения поставленных целей.

Литература:

1. Гридин, С. В. Математическое моделирование процессов переноса при распространении теплового сброса технологических вод и газоаэрозольных выбросов ТЭС / Гридин С. В., Онищенко С. А. // Вестник Академии гражданской защиты. 2019. № 1 (17). С. 81-89.

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Крапивин А.С., Гридин С.В.

Донецкий национальный технический университет

Энергетическая отрасль во всем мире переживает глубокую трансформацию, обусловленную ростом потребностей населения, истощением традиционных источников энергии и необходимостью соблюдения экологических стандартов. В этих условиях вопросы повышения энергоэффективности теплоснабжения приобретают особую значимость, одним из ключевых направлений при этом является разработка и внедрение мероприятий по снижению гидравлических и тепловых потерь в тепловых сетях, так как именно на этом этапе транспортировки теряется значительная часть произведенной тепловой энергии [1, 2].

Тепловые сети (ТС), являясь важнейшей составляющей системы коммунального хозяйства, выполняют задачу передачи тепловой энергии от источников (котельных, ТЭЦ) к конечным потребителям. Эффективность работы ТС напрямую влияет на качество жизни населения, на издержки предприятий, а также на объем выбросов вредных веществ в окружающую среду. Однако ТС большинства городов, особенно в России и странах постсоветского пространства, были построены десятилетия назад и в значительной степени устарели как физически, так и морально. Износ оборудования, низкое качество теплоизоляции, несовершенные схемы прокладки трубопроводов — все это ведет к значительным гидравлическим и тепловым потерям.

Тепловые сети на сегодня - это наиболее уязвимое звено во всей цепочке теплоснабжения «генерация–транспорт–распределение». Общая протяженность ТС, по данным Росстата [1], составляет 167,220 тыс. км, с общей площадью поверхности около 180 км², количество абонентов - примерно 44 млн.

Около 70% ТС работает более 25 лет, т.е. свыше нормативного срока службы [1]. В целом по РФ срок службы более 30 лет имеют 45% сетей, от 25 до 30 лет – 25%, и лишь 30% имеют срок службы менее 25 лет. Протяженность ТС, нуждающихся в замене, в 2022 г. [1] составила 50,597 тыс. км в двухтрубном исчислении. Это почти 30,3% всех ТС в стране (табл.1, [1]).

Таблица 1 – Доля в общей длине тепловых сетей, нуждающихся в замене, ветхих и замененных, в двухтрубном исчислении в РФ в 2000-2022 гг., %

Показатель	2000	2006	2010	2015	2018	2020	2021	2022
Доля нуждающихся в замене	16,0	25,0	28,0	29,1	28,9	30,8	30,2	30,3
Доля ветхих	21,1	21,3	21,7	22,1	22,4	23,2	23,0	23,3
Доля заменённых	2,8	2,1	2,0	2,2	1,9	2,0	1,94	1,87

Ежегодно необходимо менять не менее 4-5% от всех сетей в год [3-5], но по факту в среднем заменяется около 2%, что ведет к наращиванию их износа. Потери тепловой энергии в ТС в 2022 г. составляли 13,7% [1], однако многие эксперты считают, что реальные потери выше и достигают 20-30% [6], судя по тому, что, например, в 2020 г. произошло 3693 аварии, в 2021 г. - 4176; в 2022 г. - 3661 [1].

Проблема потерь в ТС имеет сложный и многослойный характер. Гидравлические потери, представляющие собой падение давления вследствие трения теплоносителя о внутреннюю поверхность трубопроводов, зависят от состояния труб, их диаметра, длины трассы и наличия различного рода сопротивлений (изгибов, сужений, арматуры). Чем больше гидравлические потери, тем выше требования к насосным станциям, а значит, тем больше расход электроэнергии на перекачку теплоносителя.

Тепловые потери происходят за счет передачи тепла через стенки трубопровода в окружающую среду. На их величину влияют температурные перепады, свойства теплоизоляционных материалов, качество монтажа сетей и погодные условия. В зимнее время при сильных морозах недостаточная теплоизоляция приводит к утечке больших объемов тепла, в результате чего источник тепловой энергии вынужден производить избыточную нагрузку, чтобы поддерживать необходимую температуру на стороне потребителя [3, 4].

Повышение энергоэффективности ТС путем снижения гидравлических и тепловых потерь становится особенно актуальным в условиях современного энергоперехода, ориентированного на устойчивое развитие. Энергосбережение позволяет не только снизить стоимость теплоснабжения для конечных пользователей, но и уменьшить зависимость экономики от ископаемых источников энергии, сократить выбросы парниковых газов и улучшить экологическую обстановку в регионах [1].

Исторически подходы к проектированию ТС основывались на избытке мощностей и допущении относительно высоких потерь, что было допустимо в условиях низкой стоимости энергоносителей [2]. Однако современная парадигма требует перехода от экстенсивной к интенсивной модели развития теплоснабжения, где основное внимание уделяется минимизации потерь и оптимизации всех этапов производства, транспортировки и потребления тепловой энергии [1, 5].

В числе основных мероприятий по снижению потерь можно выделить комплексную модернизацию ТС. На проектной стадии очень важно правильно подобрать диаметр трубопроводов: увеличение диаметра труб при сохранении расчетного расхода позволяет значительно сократить гидравлические потери за счет уменьшения скорости теплоносителя. В реальных проектах повышение диаметра труб на 10–15% может привести к снижению гидравлических потерь на 30–40%.

Современные материалы для трубопроводов также оказывают большое влияние на эффективность работы сетей. Стальные трубы, традиционно используемые в теплоснабжении, обладают высокой прочностью, но склонны к

коррозии и зарастанию внутренней поверхности. В последнее время все шире применяются трубы из сшитого полиэтилена (РЕХ) и полипропилена, а также стальные трубы с антикоррозионным покрытием и предварительной изоляцией из пенополиуретана (ППУ). Эти решения позволяют не только повысить срок службы сетей, но и значительно сократить потери тепла.

Использование современных изоляционных материалов, таких как ППУ в сочетании с защитной оболочкой из полиэтилена, позволяет снизить теплопотери трубопроводов до 2–5% от общего объема передаваемой энергии. При этом срок службы таких систем может достигать 30–40 лет без необходимости замены или ремонта теплоизоляции. Важно отметить, что эффективность теплоизоляции зависит не только от качества материалов, но и от правильности их монтажа, что требует строгого соблюдения технологических регламентов на всех этапах строительства и эксплуатации ТС.

Автоматизация управления ТС открывает дополнительные возможности для снижения тепло- и гидروطерь. Внедрение интеллектуальных систем мониторинга, основанных на использовании датчиков температуры, давления и расхода, позволяет в режиме реального времени контролировать параметры работы системы, выявлять участки с повышенными потерями и оперативно устранять неисправности. Системы SCADA, а также новейшие технологии обработки больших данных (Big Data) обеспечивают не только сбор информации, но и автоматическую оптимизацию режимов работы сетей в зависимости от текущих погодных условий и потребностей пользователей.

Зарубежный опыт подтверждает эффективность системного подхода к модернизации теплоснабжения. В Дании, например, около 65% всей тепловой энергии передается через централизованные системы теплоснабжения, при этом тепловые потери в сетях не превышают 10% [4]. Это стало возможным благодаря строгим стандартам качества проектирования, широкому использованию предварительно изолированных трубопроводов и активному внедрению систем интеллектуального управления.

В России также реализуются масштабные программы модернизации ТС. В рамках государственной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» активно проводится замена изношенных трубопроводов, внедряются автоматизированные системы управления, используются современные методы диагностики состояния сетей. Однако, учитывая масштаб существующей инфраструктуры и высокий процент износа, необходимы дальнейшие усилия, в том числе создание механизмов государственно-частного партнерства для привлечения инвестиций в эту сферу.

Экономические аспекты внедрения мероприятий по снижению потерь имеют первостепенное значение. Снижение гидравлических потерь напрямую приводит к сокращению потребления электроэнергии насосными станциями, а уменьшение тепловых потерь — к снижению расхода топлива на источниках тепла. Совокупный эффект может достигать десятков процентов от общих эксплуатационных расходов предприятий теплоснабжения. При этом сроки окупаемости инвестиций в модернизацию сетей могут варьироваться в

широких пределах: от 3–4 лет при локальной модернизации до 7–10 лет при реализации масштабных инфраструктурных проектов [5].

Перспективы развития теплоснабжения тесно связаны с переходом к концепции интеллектуальных теплосетей (Smart Heating). В будущем ТС станут частью единой энергетической системы города, интегрированной с электрическими сетями, водоснабжением и системами управления зданиями. Технологии накопления тепла, использование тепловых насосов, внедрение распределенных источников энергии позволят повысить гибкость систем теплоснабжения и минимизировать потери на всех этапах транспортировки и распределения тепловой энергии.

Таким образом, разработка мероприятий по снижению гидравлических и тепловых потерь в тепловых сетях является неотъемлемой частью стратегии устойчивого развития городов и регионов. Она требует комплексного подхода, сочетающего технические, экономические и управленческие решения. Только при активной поддержке государства, участии бизнеса и научного сообщества можно добиться существенного повышения эффективности теплоснабжения, снизить нагрузку на окружающую среду и обеспечить энергетическую безопасность будущих поколений.

Литература:

1. Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии : монография / А. Б. Бирюков, П. А. Гнителиев, А. Н. Лебедев, С. В. Гридин : ФГБОУ ВО "ДонНТУ". - Донецк : ИП Криничная И.В. 2024. - 343 с.
2. Гридин, С. В. Критерий оценки эффективного функционирования тепловой сети / Гридин, С. В., Бирюков, А. Б. // Энергетические системы - Белгород : ФГБОУ БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2024. - т. 9 вып. № 1 (003). - С. 22-33.
3. Гридин, С. В. Анализ методов диагностирования трубопроводов тепловых сетей для определения их фактического технического состояния / Гридин С. В., Бирюков А. Б. // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 2. - С. 69-79.
4. Бирюков, А. Б. Моделирование и прогнозирование потребления тепловой энергии с использованием погодных данных / А. Б. Бирюков, С. В. Гридин // Информатика и кибернетика. - Донецк: ДонНТУ, 2024. - №1(35). - С. 5-16.
5. Гридин, С. В. Анализ энергоэффективности работы отопительной котельной на этапах выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии / С. В. Гридин, А. Б. Бирюков // В сборнике: Энергетическая эффективность промышленных объектов и городской инженерной инфраструктуры. Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции (школы семинара) Института энергоэффективности и водородных технологий "НИУ "МЭИ": Санкт-Петербург, 2024. - С. 197-200.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ СИСТЕМЫ ЖКХ

Каминский К.Д., Лебедев А.Н.

Донецкий национальный технический университет

В современном мире, где потребность в энергии постоянно растёт, а стоимость топлива увеличивается, эффективное использование ресурсов становится ключевым фактором для теплогенерирующих установок. Водогрейные котлы, используемые в системах ЖКХ, требуют модернизации для повышения их эффективности (КПД). Одним из перспективных направлений является внедрение комбинированных устройств для глубокого охлаждения дымовых газов, что позволяет значительно снизить температуру отходящих газов и уменьшить расход топлива.

Температура отходящих газов после котлов достаточно высока и составляет 140–200°C, однако существуют возможности для её снижения, что приведёт к экономии топлива. Основное требование к температуре продуктов сгорания заключается в предотвращении конденсации водяных паров в процессе их удаления. Появление конденсата в дымовых трубах может вызвать коррозию металла и разрушение кладки во время эксплуатации. Исследования процессов, происходящих в дымовых трубах, приведены в работах [1, 2].

Содержание водяных паров в дымовых газах зависит от состава топлива и условий его сжигания и обычно колеблется в пределах 15–20%. Температура, при которой начинается процесс конденсации, называется температурой точки росы для продуктов сгорания. Существует несколько методик и расчётных формул для определения этой температуры. Часто для её вычисления используется формула Аронова И. З. [3], которая учитывает только коэффициент избытка воздуха при сжигании, или методика, предложенная в нашей работе [4], применимая для произвольного состава природного газа.

Для продуктов сгорания природного газа температура точки росы обычно находится в диапазоне 53–57 °C, что значительно ниже температуры дымовых газов после котла. Таким образом, даже с учётом тепловых потерь и определённого температурного запаса существует возможность охлаждения продуктов сгорания до температуры точки росы или ниже, что особенно важно для использования удельной теплоты парообразования при конденсации водяного пара. Согласно существующим исследованиям, температура продуктов сгорания после теплоутилизатора может составлять 35–40 °C. Чтобы избежать последующей конденсации водяных паров в дымовых каналах и трубе, в них через байпас подмешиваются неохлаждённые дымовые газы или предварительно нагретый воздух.

Методы исследования. В сфере теплоэнергетики проводятся исследования по созданию систем глубокой утилизации тепла, образующегося при сжигании топлива. В российской и зарубежной литературе обсуждаются плюсы и минусы

разных конструкций теплоутилизаторов. Особое внимание уделяется работам А. А. Кудинова, С. К. Зиганшиной и научной группы под руководством А. В. Ефимова. Эти исследования включают методы расчёта установок, их технические характеристики и результаты практического применения с акцентом на использование поверхностных теплообменников.

Одна из важных задач — выбрать оптимальную конфигурацию системы глубокого охлаждения дымовых газов для определённых типов водогрейных котлов. Это позволит увеличить коэффициент полезного действия котельной и снизить потребление природного газа. Также следует учесть необходимость конденсационного экономайзера для подогрева воды, поскольку проектирование только конденсационного воздухоподогревателя нецелесообразно из-за низкой теплоёмкости воздуха и неравномерного выделения тепла.

В качестве объекта исследования был выбран один из самых распространённых водогрейных котлов типа ТВГ-8М. В результате теплового расчёта по стандартной методике были определены основные параметры котла, такие как коэффициент избытка воздуха после экономайзера — 1,28, теоретическое количество воздуха на горение — $V_B^0 = 9,866 \text{ м}^3/\text{м}^3$ т-ва, объем дымовых газов после котла — $V_{yx} = 13,864 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Эти данные использовались для анализа характеристик воздухоподогревателя и конденсационного экономайзера. Дальнейшие расчёты проводились по методике, предложенной А.А. Кудиновым и С.К. Зиганшиной. Расчёты выполнялись для разных температур дымовых газов после воздухоподогревателя (97, 107, 117, 127°C). Видно, что при изменении температуры дымовых газов после воздухоподогревателя меняется соотношение их объёмных долей, поступающих в экономайзер и байпас, чтобы поддерживать заданную температуру (70°C) на выходе в дымовую трубу. График зависимости этого соотношения представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 — Зависимость доли продуктов сгорания на экономайзер от их температуры после воздухоподогревателя

В данной работе рассматривается схема теплообменника с перекрестным током. В воздухоподогревателе дымовые газы проходят через стальные трубы с внутренним диаметром 30 мм и наружным 35 мм, в то время как воздух омывает их внешнюю поверхность. Начальная температура воздуха принята

равной 30°C, что соответствует температуре в котельной. Средние температуры дымовых газов после воздухоподогревателя составляют: 92°C при $t_{вп}''=97^\circ\text{C}$; 84,5°C при 107°C; 77,5°C при 117°C; и 70,5°C при 127°C. Теплофизические свойства воздуха при этих средних температурах (плотность, массовая теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и критерий Прандтля), были определены на основе данных [8].

В качестве основного элемента конденсационного экономайзера был выбран биметаллический калорифер типа КСк-4-11-02 ХЛЗ, производимый на АО «Калориферный завод», г. Кострома. Этот калорифер успешно применялся Кудиновым А.А. и его коллегами [2, 5] на Ульяновской ТЭЦ-3. Основные характеристики и размеры данного теплообменника описаны в работе [2].

Методика расчета экономайзера изложена в работе А.А. Кудинова и С.К. Зиганшиной [2] и была использована в нашем исследовании [10]. В связи с неизвестностью площади теплообменника на данном этапе используется метод последовательных приближений [2, 5]. Суть метода заключается в предварительном определении площади теплообменника, критерия орошения и поверхности экономайзера на основе уравнения теплопередачи. Если полученные значения площади не совпадают, проводится корректировка и расчёт продолжается до достижения необходимой точности.

Критерии Нуссельта и коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке определяются с использованием уравнения, предложенного А. А. Кудиновым [5]. Уточнённая площадь поверхности теплообмена конденсационного поверхностного теплоутилизатора рассчитывается на основе уравнения теплопередачи и сравнивается с первоначальной площадью.

Результаты расчётов параметров конденсационного экономайзера представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики конденсационного экономайзера

Температура дыма °C	Q, кВт	G _в , кг/с	Δt _{ср} , °C	W, кг/(м ² ·ч)	Критерий орошения K _г	α _д , Вт/(м ² ·K)	α _в , Вт/(м ² ·K)	K, Вт/(м ² ·K)	F, м ²
97	324,3	2,59	42,07	2,038	0,517	53,4	10891	53,06	145,3
107	399,8	3,19	46,05	2,26	0,569	56,63	10891	56,24	154,4
117	458,3	3,66	49,86	2,343	0,588	57,65	10891	57,25	160,6
127	524,6	4,18	53,54	2,444	0,605	58,55	10891	58,14	168,5

Также данная методика была применена для расчета устройства глубокой утилизации теплоты продуктов сгорания для котла ПТВМ-30М. В качестве исходных данных использовались результаты расчета теплового баланса котла ПТВМ–30М, выполненного в соответствие с нормативным методом. В результате теплового расчёта были определены основные параметры, такие как коэффициент избытка воздуха после экономайзера – 1,29, теоретическое количество воздуха на горение – $V_B^0=9,42 \text{ м}^3/\text{м}^3$, объем дымовых газов после котла – $V_{yx}=13,36 \text{ м}^3/\text{м}^3$. По методике, приведенной выше, получено, что для

данного типа котла целесообразно выполнить установку воздухоподогревателя и конденсационного экономайзера. При этом площадь воздухоподогревателя при использовании гладких труб с внутренним диаметром 30 мм и наружным 35 мм составляет 903,55 м², для калорифера типа КСк 4-12 F_{к_т}=1050,03 м².

Таким образом, анализ литературных источников и расчёты показывают, что применение установок глубокого охлаждения продуктов сгорания после водогрейных котлов является перспективным направлением для улучшения технико-экономических показателей. Рекомендуется использовать комбинированные системы, которые снижают тепловые потери и экономят природный газ за счёт подогрева воздуха для горения. Расчёты показывают, что оптимальная температура уходящих газов после воздухоподогревателя для котла должна быть в диапазоне от 115 до 130°С при использовании биметаллического калорифера типа КСк-4 ХЛЗ, производимый на АО «Калориферный завод», г. Кострома.

Литература:

1. Мустяцэ В.Т., Бутенко Н.А., Вареник А.М. Исследование температурного поля и технического состояния дымовой трубы на ТЭЦ-1 г. Кишинёва // Материалы Междунар. конф. «Энергия Молдовы». Региональные аспекты развития. – Чизинау, Республика Молдова, 2012.
2. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
3. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
4. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания природного газа // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. №6. С.43-49.
5. Кудинов А. А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 139 с.
6. Ефимов А. В., Гончаренко, А.Л., Гончаренко, Л.В., Есипенко, Т.А. Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения / Под ред. А.В. Ефимова. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – 233 с.
7. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: «Энергия». - 2000. - 380 с.
8. Володин В. И., Карлович Т. Б. Примеры теплового расчета конвективных поверхностей нагрева парового котла и конденсатора паротурбинной установки. – Минск: БГТУ, 2023. – 74 с.
9. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. – М.: «Энергия». – 1977. – 345 с.
10. Бирюков А. Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Использование комбинированных устройств глубокого охлаждения дымовых газов на водогрейных котлах системы ЖКХ // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 69-81.

ИННОВАЦИИ В КОНСТРУКЦИИ КОТЛА ТВГ-8М: МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСТАНДАРТНЫХ ФОРМ ТРУБ

Гребенюк А.А., Сафонова Е.К.

Донецкий национальный технический университет

Котел ТВГ-8М является одним из ключевых элементов тепловых систем, используемых в промышленности и энергетике для отопления. Одним из основных аспектов его эффективности является конструкция теплообменных поверхностей, которые обеспечивают оптимальное теплообменное взаимодействие между горячими газами и рабочими жидкостями.

Одной из инноваций в области модернизации котлов является использование нестандартных форм труб, что приводит к улучшению теплообменных характеристик и экономии топлива.

Гистограмма (рис.1), показывает зависимость площади поверхности нагрева конвективной части котла ТВГ-8М от формы труб. Как видно из графика, каждая форма труб имеет свой эффект влияния на поверхность нагрева, что в свою очередь влияет на эффективность теплообмена.



Рисунок 1 – Поверхности нагрева конвективной части котла ТВГ-8М для различных форм труб

Круглые трубы имеют наименьшую площадь поверхности нагрева среди всех представленных форм. Это объясняется тем, что округлая форма обладает

минимальной боковой поверхностью, что снижает общую эффективность теплообмена. Несмотря на это, круглые трубы традиционно используются в большинстве котлов, так как они проще в обслуживании и производстве.

Овальные трубы немного превосходят круглые по площади поверхности нагрева, что позволяет улучшить теплообмен, однако их экономическая эффективность и технологические характеристики остаются ниже, чем у более сложных форм труб.

Прямоугольные трубы демонстрируют значительно большую площадь поверхности нагрева, что делает их наиболее эффективными с точки зрения теплообмена. Они обеспечивают более высокий коэффициент теплоотдачи и, следовательно, повышают общую производительность котла. Именно прямоугольные трубы следует считать оптимальными для модернизации котлов ТВГ-8М.

Квадратные трубы занимают промежуточное положение между прямоугольными и овальными трубами. Они обеспечивают хорошие теплообменные характеристики, но не столь эффективны, как прямоугольные трубы.

Треугольные трубы обладают достаточно большой площадью поверхности нагрева, однако их эксплуатационные характеристики и сложность обслуживания существенно снижают их привлекательность в сравнении с другими формами труб.

Таким образом, из анализа гистограммы можно сделать вывод, что прямоугольные трубы обеспечивают наибольшую площадь поверхности нагрева и, следовательно, являются наилучшим вариантом для модернизации котла ТВГ-8М с точки зрения теплообменных характеристик.

Таблица 1 – Экономическая оценка после модернизаций

Экономический эффект от модернизаций разных форм труб						
Формы труб	Цена топлива, руб./м ³	Экономия топлива, руб.	Затраты на реконструкцию, руб.	Экономический эффект, руб.	Оценка вложений	Срок окупаемости, лет
Овальные	5,7	26889	77760	-50870,6	Отрицательная	-
Треугольные	5,7	71705	107458	-35752,9	Отрицательная	-
Квадратные	5,7	116520	112000	4520,768	Положительная	0,96
Прямоугольные	5,7	224078	154069	70009,4	Положительная	0,68

Анализируя данные таблицы 1 по котлу ТВГ-8М, становится очевидным,

что выбор формы труб является критически важным решением в контексте повышения экономической эффективности и рентабельности работы оборудования. Из всех вариантов в таблице (овальные, треугольные, квадратные и прямоугольные трубы) только два — квадратные и прямоугольные — обеспечивают положительный экономический результат, минимальный срок окупаемости и выраженную экономию топлива. Ниже приведён подробный анализ, обосновывающий, почему именно эти формы труб считаются наиболее целесообразными для модернизации котельного оборудования.

Начнём с рассмотрения показателей овальных труб. Хотя цена топлива составляет 5,7 руб./м³ для всех форм труб, экономия топлива при использовании овальных труб достигает лишь 26889,41 рубля.

При этом затраты на реконструкцию составляют 77760 рублей, что превышает полученную экономию почти в три раза. Это приводит к отрицательному экономическому эффекту в размере –50870,6 рубля. Следовательно, модернизация с использованием овальных труб не только неэффективна, но и ведёт к прямым убыткам. Именно поэтому инвестиционная оценка для этого варианта признана отрицательной.

Похожая ситуация наблюдается и с треугольными трубами. Несмотря на несколько более высокую экономию топлива (71705,09 рублей), затраты на реконструкцию (107458 рублей) также превышают этот показатель. Итоговый экономический эффект составляет –35752,9 рубля. Таким образом, модернизация с использованием треугольных труб также приводит к финансовым потерям. Оценка вложений, как и в предыдущем случае, отрицательная.

На этом фоне особенно выгодно выглядят квадратные трубы. Экономия топлива при их применении составляет 116520,8 рубля, а затраты на реконструкцию – 112000 рублей. Это единственный из четырёх вариантов, где экономия превышает затраты. Экономический эффект – положительный и составляет 4520,77 рубля. Хотя эта сумма относительно невелика, она свидетельствует о том, что проект не только окупается, но и приносит прибыль.

Кроме того, срок окупаемости составляет всего 0,96 года, то есть инвестиции возвращаются менее чем за один год эксплуатации. Это критически важный параметр для принятия инвестиционных решений, особенно в условиях ограниченного бюджета. Более того, положительная оценка вложений подчёркивает целесообразность применения квадратных труб как сбалансированного и безопасного инвестиционного решения.

Однако наилучшие показатели наблюдаются у прямоугольных труб. Экономия топлива составляет внушительные 224078,4 рублей – это почти в два раза больше, чем у квадратных труб. Затраты на реконструкцию также выше — 154069 рублей, однако это оправдывается ещё более высоким экономическим эффектом, который составляет 70009,4 рублей. Это максимальный положительный результат среди всех рассмотренных вариантов.

Более того, срок окупаемости составляет всего 0,68 года, то есть вложения

окупаются менее чем за восемь месяцев. В условиях высоких эксплуатационных расходов это означает, что экономия начинает приносить чистую прибыль уже в течение первого года после внедрения. Положительная оценка вложений подтверждает высокий инвестиционный потенциал данного варианта.

Таким образом, модернизация котла ТВГ-8М с использованием квадратных и прямоугольных труб представляет собой обоснованное техническое и экономическое решение. Квадратные трубы обеспечивают сбалансированный вариант с умеренными затратами, быстрой окупаемостью и положительным результатом. Прямоугольные трубы, в свою очередь, демонстрируют наивысшую эффективность по всем ключевым показателям: максимальная экономия топлива, самый большой экономический эффект и кратчайший срок окупаемости.

Принимая во внимание все эти данные, можно с уверенностью утверждать, что именно прямоугольные трубы являются наилучшим выбором для модернизации котла ТВГ-8М. При этом квадратные трубы остаются надёжной альтернативой с более низкими начальными затратами и устойчивой рентабельностью.

Предпочтение между этими двумя формами может зависеть от конкретных условий проекта, бюджета и требований к сроку возврата инвестиций, но оба варианта являются технически и экономически оправданными.

Литература:

1. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. - М.: Энергия, 1973. -296 с.
2. Устройство и эксплуатация котлов и котельного оборудования: [Учеб. пособие для сельск. проф.-техн. училищ] / Н. А. Киселев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высш. школа, 1976. - 232 с.

АНАЛИЗ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЛУЧШЕНИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА В КОТЛАХ ТВГ-8М: НОВЫЕ ФОРМЫ ТРУБ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Гребенюк А.А., Сафонова Е.К.

Донецкий национальный технический университет

Актуальность повышения эффективности котельных установок с водотрубными котлами типа ТВГ-8М продиктована необходимостью повышения топливной экономичности, надежности теплоснабжения и соответствия современным экологическим стандартам.

Одним из наиболее уязвимых элементов конструкции является теплообменная поверхность в конвективной части котла. Именно здесь происходят ключевые процессы передачи тепла от уходящих дымовых газов к воде, и любые потери в этой зоне напрямую снижают коэффициент полезного действия (КПД) котельной.

В данной статье проведён анализ работы котельной на основании данных о КПД за два характерных месяца — ноябрь и январь, а также предложены инженерные рекомендации по установке новых типов труб (овальных, треугольных, квадратных и прямоугольных) в целях повышения теплообменной эффективности и модернизации оборудования.

График (рисунок 1), отображающий изменение КПД котельной в течение ноября и января, наглядно демонстрирует неустойчивость работы и отклонения от нормативных значений. В ноябре (красная линия), при относительно тёплой погоде ($+6^{\circ}\text{C}$), наблюдается значительное снижение эффективности. КПД часто колеблется в пределах 50–70%, а в отдельных случаях наблюдаются кратковременные скачки выше 100%, что может быть связано с искажениями в учёте или нарушением режимов работы оборудования.

Такая разбалансировка системы, несмотря на пониженную нагрузку в тёплый период, указывает на низкую адаптивность теплогенератора и недостаточную эффективность теплообменных элементов. Январь, наоборот, представляет собой холодный период (до -5°C), при котором котельная должна демонстрировать стабильную и максимальную производительность.

Однако, даже в условиях высокой тепловой нагрузки, КПД в значительном числе случаев не превышает 75–85%, а временами падает до 60%, что говорит о серьёзных эксплуатационных и конструктивных недостатках.

Таким образом, вне зависимости от сезона, котельная работает с серьёзными потерями энергии, что требует модернизации ключевых компонентов - в первую очередь, теплообменных труб.

Причиной такой низкой эффективности является недостаточное использование тепла уходящих газов в конвективной части. Текущие конструкции водотрубных котлов ТВГ-8М базируются на классических круглых трубах, которые имеют ряд эксплуатационных преимуществ (простота изготовления, доступность), но при этом не обеспечивают достаточной

площади контакта или интенсификации потока.

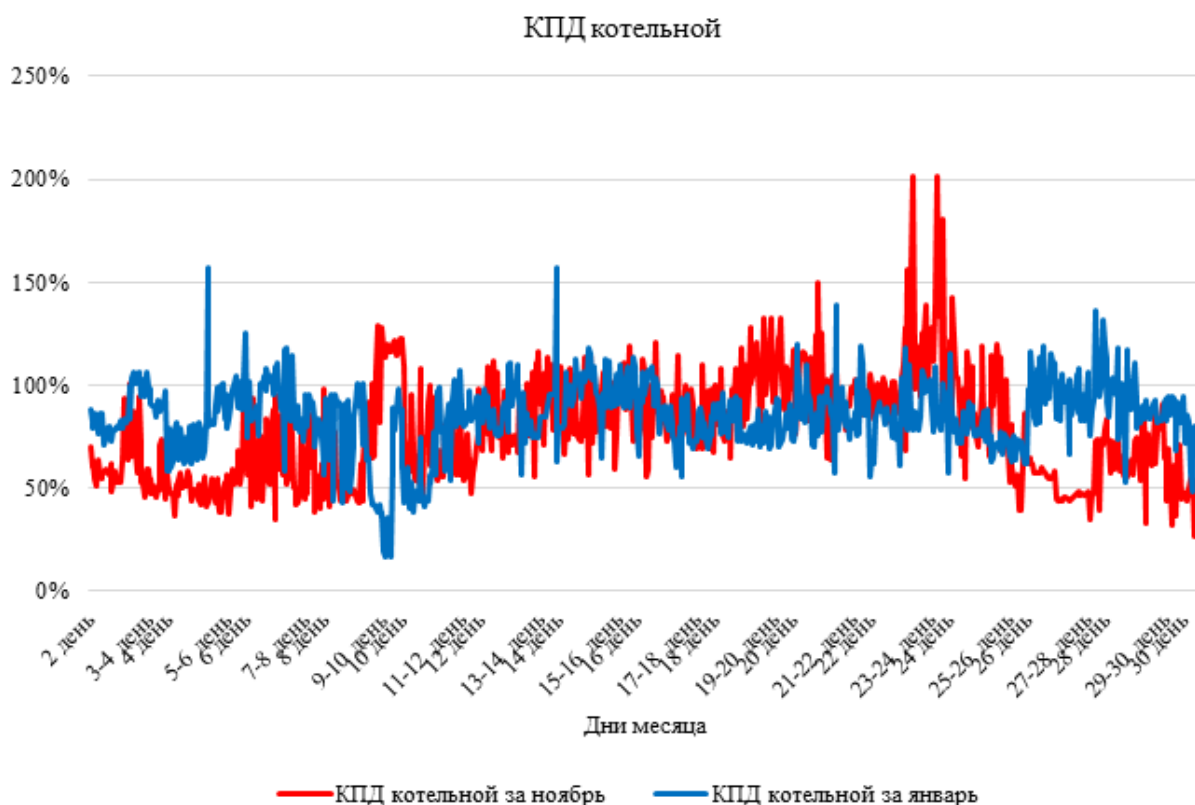


Рисунок 1 – График КПД котельной с котлами ТВГ-8М за январь и ноябрь месяцы

В условиях переменных нагрузок и загрязнения внутренней поверхности труб это приводит к резкому падению коэффициента теплоотдачи. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо перейти к использованию труб с улучшенной геометрией, адаптированной к условиям теплообмена в конвективной зоне.

Одним из наиболее перспективных направлений является применение овальных труб (рис.2).

Их преимущество заключается в увеличенной площади теплообмена при сохранении компактности. Плоские стенки овальной формы обеспечивают более равномерный прогрев, а аэродинамические свойства такой геометрии способствуют турбулизации потока газа.

Это особенно эффективно в условиях высокой скорости движения продуктов сгорания в конвективной части, где важно обеспечить максимально возможную теплопередачу.

Кроме того, овальные трубы меньше подвержены вибрационным нагрузкам и устойчивы к образованию завихрений, что положительно сказывается на ресурсе оборудования.



Рисунок 2 – Различные формы сечений труб

Треугольные трубы представляют собой нетривиальное, но технически обоснованное решение. Их главная особенность — острые углы, в которых возникают интенсивные завихрения и локальное увеличение теплопередачи. Поток газа, проходя вдоль такой поверхности, испытывает регулярные изменения направления, что увеличивает турбулентность и улучшает теплообмен.

Несмотря на более сложную технологию изготовления, такие трубы могут быть особенно эффективны в участках с наибольшими потерями тепла, обеспечивая повышение локального КПД на 10–12% по сравнению с круглыми аналогами. Однако важно учитывать необходимость повышения прочности соединений, особенно в местах сварки.

Квадратные трубы (рис. 2) находят применение в конструкциях, где требуется высокая плотность размещения элементов. Благодаря равным сторонам, такие трубы могут быть максимально плотно установлены друг к другу, создавая "пакет" теплообменников с минимальными зазорами.

Это позволяет значительно увеличить площадь теплопередающей поверхности на единицу объёма. Дополнительным преимуществом является равномерность нагрева стенок, что снижает температурные напряжения и риск коррозии. Однако при высокой плотности размещения могут возникнуть проблемы с обдувкой, что требует расчёта оптимального расстояния между трубами.

Прямоугольные трубы (рис.2) сочетают достоинства овальных и квадратных форм. Они обеспечивают увеличенную площадь контакта при умеренной массе и высокой прочности конструкции. Их применение особенно оправдано в секциях с интенсивным потоком дымовых газов. Благодаря своей геометрии, такие трубы можно ориентировать вдоль направления движения газов, добиваясь "направленного" теплообмена.

Прямоугольная форма также упрощает монтаж и обслуживание, особенно при модульной сборке конвективной части котла. В инженерных испытаниях такие трубы демонстрируют прирост КПД на 8–10% по сравнению с базовыми моделями.

Внедрение современных теплообменных труб в конвективной части водотрубных котлов ТВГ-8М имеет высокий потенциал для повышения энергетической эффективности и снижения эксплуатационных издержек. График КПД за ноябрь и январь убедительно показывает необходимость модернизации: система демонстрирует нестабильность при малой и высокой нагрузке, что типично для конструкций с низкой инерционностью и ограниченной теплообменной поверхностью.

Замена труб на более эффективные формы способна обеспечить рост КПД до проектных 90–95%, снизить потери в дымовой трубе и сократить расход топлива до 15–20%.

Помимо этого, такие изменения позволят уменьшить пиковые нагрузки на автоматику и регулировочное оборудование, а также продлить срок службы котельной установки без капитального вмешательства.

Таким образом, проведённый анализ подтверждает необходимость системной модернизации теплообменных поверхностей в котлах ТВГ-8М. Использование новых форм труб — овальных, треугольных, квадратных и прямоугольных — является обоснованным и технически достижимым решением.

Литература:

1. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. - М.: Энергия, 1973. -296 с.

ЭКОЛОГИЯ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ОХРАНА ТРУДА В МЕТАЛЛУРГИИ



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЗОВОВ

Пастухов И.Б., Асламова Я.Ю., Парфенюк С.А.
Донецкий национальный технический университет

Современная чёрная металлургия сталкивается с серьезными вызовами в области экологической безопасности. Традиционные методы производственного экологического контроля (ПЭК) зачастую оказываются недостаточно эффективными для решения комплексных задач, связанных с сокращением выбросов, сбросов и утилизацией отходов. В этой связи, все большее значение приобретает внедрение инновационных технологий, включая наилучшие доступные технологии (НДТ) и цифровые решения, позволяющие повысить эффективность мониторинга, анализа и управления экологическими рисками.

Эффективный ПЭК на предприятиях чёрной металлургии является ключевым инструментом для минимизации негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения устойчивого развития отрасли. К основным направлениям ПЭК, требующим особого внимания в современных условиях, относятся:

1. Идентификация и оценка экологических рисков. При этом важна комплексная идентификация экологических аспектов и оценка значимости вредных воздействий на компоненты природной среды, возникающих в результате основного и вспомогательного производств. Важным является акцент на анализ рисков возникновения аварийных ситуаций и разработке мер по их предотвращению и ликвидации.

2. Обеспечение соблюдения экологических требований. Особое внимание при организации ПЭК должно быть уделено систематическому контролю соблюдения установленных нормативов, правил обращения с опасными отходами и веществами, а также требований по охране атмосферного воздуха, водных объектов и земель. Это включает в себя мониторинг эффективности работы природоохранного оборудования и сооружений, а также контроль за соблюдением условий разрешительной документации.

3. Мониторинг состояния окружающей среды. Это направление подразумевает организацию систематического контроля (в том числе инструментального) состояния компонентов природной среды (атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почв) в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) и зоне влияния предприятия. Необходимо детально проанализировать использование современных методов мониторинга, включая автоматизированные системы и дистанционное зондирование.

4. Оценка эффективности природоохранных мероприятий. Для повышения экологической безопасности металлургического производства на предприятии важно оценить эффективность работы систем очистки отходящих газов и

сточных вод, систем оборотного водоснабжения, а также объектов размещения и обезвреживания отходов. Необходим анализ достаточности и результативности применяемых технологий с целью их оптимизации и внедрения наилучших доступных технологий (НДТ).

5. Предупреждение и ликвидация аварийных ситуаций. Важным профилактическим мероприятием является контроль технического состояния оборудования, предназначенного для локализации и ликвидации последствий техногенных аварий, а также разработка и реализация планов действий в чрезвычайных ситуациях, направленных на минимизацию ущерба окружающей среде и здоровью населения.

6. Информационное обеспечение и отчетность. Своевременная подготовка и представление достоверной информации федеральным и региональным органам исполнительной власти (данные мониторинга, государственная статистическая отчетность в области охраны окружающей среды и природопользования и т.д.), а также обеспечение прозрачности экологической информации для общественности формирует положительный имидж металлургического предприятия.

Основными объектами ПЭК на предприятиях черной металлургии являются:

- источники образования отходов, источники выбросов и сбросов загрязняющих веществ;
- системы очистки сточных вод, системы очистки отходящих газов, системы оборотного водоснабжения, объекты размещения и обезвреживания отходов;
- объекты окружающей природной среды (включая биологические компоненты экосистем), расположенные в пределах промышленной площадки, СЗЗ, зоны влияния предприятия;
- системы предупреждения, локализации и ликвидации последствий техногенных аварий и иных чрезвычайных ситуаций, приводящих к негативным воздействиям на окружающую среду.

Современная концепция ПЭК предполагает не только контроль и мониторинг, но и активное внедрение превентивных мер, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду на всех этапах производственного процесса. Это требует комплексного подхода, включающего в себя использование современных технологий, повышение квалификации персонала и эффективное взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Действенная система ПЭК является необходимым условием для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития предприятий черной металлургии. Она представляет собой комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, направленных на предотвращение, снижение и контроль негативного воздействия производственной деятельности на окружающую среду.

Основой ПЭК является четкое распределение ответственности и организация работы экологической службы предприятия. Экологическая служба должна быть укомплектована квалифицированными специалистами, обладающими необходимыми знаниями и опытом в области охраны окружающей среды.

В каждом производственном подразделении предприятия должны быть назначены ответственные лица за соблюдение экологических требований и выполнение мероприятий по охране окружающей среды. Они осуществляют оперативный контроль за соблюдением технологических регламентов, правил обращения с отходами и загрязняющими веществами, а также за работой природоохранного оборудования.

Экологическая служба должна тесно взаимодействовать с другими подразделениями предприятия, такими как производственные цеха, технические службы, отдел охраны труда и промышленной безопасности, для обеспечения комплексного подхода к решению экологических проблем.

Основным документом, определяющим цели, задачи, направления и мероприятия по охране окружающей среды на предприятии является Программа ПЭК. Разработка программы ПЭК должна осуществляться на основе результатов анализа экологических рисков, оценки воздействия на окружающую среду и требований законодательства.

Программа ПЭК должна включать в себя: перечень контролируемых объектов и показателей, методы и средства контроля, сроки проведения контрольных мероприятий, порядок учета и анализа результатов контроля, мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду, а также систему оценки эффективности ПЭК.

Важнейшими элементами ПЭК являются инструментальный контроль и мониторинг, которые позволяют получать объективную информацию о состоянии окружающей среды и эффективности природоохранных мероприятий.

Инструментальный контроль включает в себя отбор проб атмосферного воздуха, воды, почвы, отходов и других объектов, а также проведение лабораторных анализов для определения содержания загрязняющих веществ. При проведении анализов должны использоваться аттестованные методики и аккредитованные лаборатории. Внедрение автоматизированных систем мониторинга позволяет осуществлять непрерывный контроль за выбросами, сбросами и другими показателями, а также оперативно реагировать на отклонения от установленных нормативов.

Результаты ПЭК должны документироваться и представляться в виде отчетов, журналов, протоколов и других документов.

Несмотря на наличие нормативной базы и организационных структур, существующая система ПЭК на многих предприятиях чёрной металлургии сталкивается с рядом проблем:

1. Применяемые методы контроля не всегда обеспечивают достаточную точность и достоверность результатов.

2. На многих предприятиях используется устаревшее оборудование, не позволяющее обеспечить требуемый уровень очистки выбросов и сбросов.

3. Недостаточный уровень автоматизации мониторинга затрудняет оперативный контроль состояния окружающей среды.

4. Большой объем документации и сложный порядок ее ведения создают дополнительную нагрузку на специалистов экологической службы.

5. Недостаточное финансирование экологических мероприятий ограничивает возможности предприятий по внедрению современных технологий и повышению эффективности ПЭК.

Преодоление этих проблем требует комплексного подхода, включающего в себя модернизацию оборудования, внедрение современных технологий, автоматизацию мониторинга, совершенствование организационной структуры и повышение квалификации персонала.

Изучение опыта организации ПЭК на ведущих предприятиях черной металлургии Российской Федерации позволяет выявить лучшие практики и определить направления совершенствования системы ПЭК в отрасли [1]. Рассмотрим некоторые примеры.

На многих предприятиях созданы специализированные управления или службы экологического контроля, в структуру которых входят аналитические лаборатории и подразделения, отвечающие за экологическое нормирование, контроль и инженерную защиту окружающей среды. Примером может служить АО «Лебединский горно-обогатительный комбинат», где функционирует Управление экологического контроля и охраны окружающей среды, объединяющее аналитическую лабораторию и бюро специалистов в области экологического нормирования и контроля.

Ведущие металлургические предприятия осуществляют мониторинг различных объектов и факторов, оказывающих влияние на окружающую среду, включая выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, качество воды поверхностных и подземных водных объектов, состояние почв, а также обращение с отходами производства и потребления. АО «Уральская Сталь» (Группа компаний «Металлоинвест») реализует подобный комплексный подход, располагая аккредитованной лабораторией мониторинга окружающей среды (ЛМОС), осуществляющей контроль выбросов, качества воздуха на СЗЗ, состояния водных объектов и почв.

Важным элементом ПЭК является проведение лабораторного контроля и инструментальных измерений с использованием аккредитованных лабораторий. Некоторые предприятия располагают собственными лабораториями, аккредитованными в установленном порядке, либо привлекают сторонние специализированные организации для выполнения анализов, не входящих в область аккредитации собственных лабораторий. Так, на АО «Синарский трубный завод» (ПАО «Трубная металлургическая компания») функционирует Центр аналитического контроля, включающий санитарно-промышленную лабораторию (СПЛ) и объединенную лабораторию по исследованию воды (ОЛИВ).

Помимо инструментального контроля и мониторинга, на предприятиях проводятся внутренние аудиты и цеховой контроль соблюдения экологических требований. ПАО «Северский трубный завод» (ПАО «Трубная металлургическая компания») организует и проводит внутренние аудиты, а также оперативный контроль соблюдения природоохранных требований в подразделениях завода. Цеховой контроль осуществляется комиссиями в соответствии с разработанными графиками, а информация публикуется на общедоступном сервере.

На ведущих предприятиях отрасли разработаны процедуры реагирования на отклонения от установленных нормативов, предусматривающие выявление причин превышения, разработку и реализацию мер по их устранению и предотвращению нарушений в будущем. На ПАО «Северский трубный завод» в случае наличия отклонений подразделения предприятия обязаны в короткие сроки предоставлять информацию о причинах превышения, принятых мерах и планируемых мероприятиях.

Таким образом, обобщая опыт, можно отметить следующие тенденции:

1. Предприятия уделяют все больше внимания организации ПЭК, создавая специализированные службы и подразделения, оснащенные современным оборудованием и укомплектованные квалифицированными специалистами.
2. Область контроля охватывает все основные объекты и факторы, оказывающие влияние на окружающую среду.
3. Предприятия принимают меры по усилению контроля соблюдения экологических требований, разрабатывают и внедряют системы управления отходами, очистки выбросов и сбросов.
4. Предприятия стремятся к повышению прозрачности экологической информации, публикуя данные мониторинга и отчетности на общедоступных ресурсах.

Анализ опыта организации ПЭК на современных предприятиях чёрной металлургии РФ позволяет выделить лучшие практики, которые могут быть использованы для совершенствования системы ПЭК в металлургической отрасли Донецкой Народной Республики. К таким практикам относятся: создание специализированных экологических служб, расширение области контроля, использование современных методов мониторинга и анализа, проведение внутренних аудитов и цехового контроля, а также разработка и реализация процедур реагирования на отклонения от установленных нормативов.

Литература:

1. ИТС 22.1-2021. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения" (утв. Приказом Росстандарта от 02.12.2021 N 2690)

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ ГОРНЫХ ОТВАЛОВ И МУСОРНЫХ ПОЛИГОНОВ

Левченко М.Э.², Павленко А.Т.², Левченко Э.П.¹

¹Донбасский государственный технический университет

²Луганский государственный университет им. В. Даля

В условия интенсивного развития техногенной цивилизации, деятельность которой оказывает самое серьёзное воздействие на глобальное изменение климата в сторону его постепенного устойчивого потепления, с каждым годом все острее встают вопросы интенсивного накопления всякого рода отходов при одновременной нехватке пресной воды [1, 2]. Одним из достаточно распространённых на территории Донбасса выступает проблема образования терриконов, содержащих в своей среде достаточно большого количества органических веществ. В первую очередь следует выделить шахтные терриконы и полигоны твёрдых бытовых отходов (ТБО). Неблагоприятное воздействие на людей и природную окружающую среду, например, горных терриконов проявляется в горении остатков угля, происходящем при большом давлении (рис. 1), что вызывается их самовоспламенением.



Рисунок 1 – Горение террикона в Донецке (2012 г.)

Механизм возгорания полигонов ТБО может быть несколько иной. В частности, существенное значение здесь оказывают как природные процессы (молнии, возможность фокусирования стеклом солнечных лучей и др.), так и человеческий фактор (курение, разведение открытого огня и т.д.). Кроме того, они склонны к самовозгоранию ввиду активной жизнедеятельности в их среде специфических микроорганизмов, способствующих выделению горючих газов – водорода метана (свалочного газа) [3].



Рисунок 2 – Горение полигона ТБО в Алчевске

Основной проблемой тушения терриконов выступает их существенный объем и масса, что как правило, создаёт очень неблагоприятны условия для возможности добраться к очагу непосредственного горения. По сути требуется выполнении целого комплекса работ по разбору террикона и перемещения его содержимого в иное место. Без этого эффективность пожаротушения практически отсутствует или резко снижается, т.к. проливания всего террикона насквозь водой достичь невозможно, тем более при её дефиците [4, 5]. Как правило, их горение продолжается до полного выгорания горючих веществ, на что порой уходят целые годы и десятилетия.

В связи с этим предлагается совершенно иной подход к решению проблем тушения терриконов. А именно максимальное воздействие газообразного огнетушащего вещества на сам очаг горения. Для этого наилучшим образом может использоваться углекислый газ ввиду его способности не поддерживать окислительные процессы в воздухе и обладающего сравнительно с воздухом относительно большим удельным весом (почти в 2 раза тяжелее воздуха) [6].

Этапы организации пожаротушения можно разделить на такие составляющие, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Мероприятия и средства ликвидации горения

Мероприятие	Используемые средства
Мониторинг мест возгорания	Беспилотные летательные аппараты
Определение направления ветра и концентрации угарного газа в воздухе	Флюгер, анемометр Датчики и газоанализаторы
Выявление места подсоса воздуха в очаг горения	Изолирующая ткань
Подача огнетушащего газа в место подсоса воздуха	Углекислый газ

Первоначально, после обнаружения объекта горения требуется выявить направление и скорость ветра, после чего с подветренной стороны выполнить измерения изменения концентрации угарного газа во времени в зависимости от скорости и направления ветра. Так как при лучшей аэрации концентрация угарного газа будет возрастать, то можно выявить участок наветренной стороны, обладающий наибольшей проникающей способностью и изолируя его покрывалом убедиться в этом.

После обнаружения наиболее вероятной зоны инфильтрации организовать подачу в неё углекислого газа. При этом по расходу количества углекислого газа на ликвидацию пожаротушения можно судить об объёме очага возгорания, так как ориентировочно расход составляет 0,7 кг на 1 м³ объёма камеры горения

Таким образом, предлагаемый механизм борьбы с горением угольных терриконов и полигонов ТБО может дополнить общепринятые меры их тушения. Проведение дальнейших научных исследований в этом направлении даст возможность совершенствования и повышения эффективности пожаротушения.

Литература:

1. Левченко, Э.П. Дополнительные источники водозабора для тушения лесостепных пожаров в Перевальском районе / Э.П. Левченко, А.Т. Павленко, А.А. Ноженко [и др.] // Экологический вестник Донбасса, 2024. – № 1(11). – С. 3–11.
2. Левченко, Э.П. Повышение эффективности борьбы с пожарами на основе автоматизации процесса тушения / Э.П. Левченко, А.Т. Павленко, М.Э. Левченко [и др.] // Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2025. – С. 216–218.
3. Подлипский, И.И. Полигоны бытовых отходов как объекты геологического исследования / И.И. Подлипский / Вестник СПбГУ. Сер. 7, 2010, вып. 1. – С. 15–31.
4. Павленко, А.Т. Повышение оперативности тушения степных пожаров на территории Донбасса с использованием карьерных вод / А.Т. Павленко, Э.П. Левченко, А.А. Ноженко, М. Э. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 10-й Международной научно-практической конференции. – Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 19–22.
5. Левченко, Э.П. Основные аспекты технической организации мер предотвращения лесных пожаров / Э.П. Левченко, В.Ю. Малкин, А.Г. Макаревич, М.Э. Левченко // Экологический вестник Донбасса. – № 6. – Алчевск : ДонГТИ, 2022. – С. 45–53.
6. Левченко, Э.П. Безопасность жизнедеятельности. Лабораторно-практические работы: Учебное пособие / Э. П. Левченко, В. А. Давиденко, А. А. Ноженко. – Алчевск : ООО "Вифлеем", 2020. – 260 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА

Левченко М.Э.², Павленко А.Т.², Левченко О.А.¹

¹Донбасский государственный технический университет

²Луганский государственный университет им. В. Даля

В сложившейся ситуации промышленные отходы металлургических предприятий оказывают столь значительное воздействие на природу и здоровье людей, что дальнейшее усиление этого влияния ведёт к серьёзным последствиям не только в промышленных районах, но и для всей планеты.

Ранее, когда загрязнение носило более локальный характер, это не вызывало серьёзной тревоги. Однако человечество впервые столкнулось с угрозой глобального изменения климата, что заставило пересмотреть подходы к предотвращению такого воздействия. Первым глобальным соглашением об охране окружающей среды, использующим рыночные механизмы, стал Киотский протокол, принятый в декабре 1997 года в Японии [1]. Это дополнение к Рамочной конвенции ООН об изменении климата обязывает развитые страны и страны с переходной экономикой снижать или стабилизировать выбросы парниковых газов.

В связи с этим, а также учитывая значительные потери сырья, в Донбасском государственном техническом университете проводятся научные исследования в рамках диссертационных работ [3–6]. Они показали, что существенную долю в общем объёме выбросов составляют процессы подготовки железных руд к плавке методом агломерации, как предварительный этап подготовки сырья к доменной плавке и производству стали [7].

В частности, в Донбассе, крупные предприятия демонстрируют высокие показатели выбросов пыли, достигающие 5-7 кг на тонну стали. Например, Алчевский металлургический комбинат, обеспечивает около 40 кг пыли на тонну выплавляемого чугуна в доменных печах. Для сравнения, в странах Евросоюза аналогичные предприятия ограничивают удельные выбросы пыли до 0,4-0,5 кг на тонну стали [8].

Анализ оборудования для дробления и измельчения в агломерационном производстве, а также технологии агломерации, показывает, что на качество сырья для доменных печей влияет не только процесс спекания железной руды, но и устойчивость дроблёного агломерата к механическому разрушению во время транспортировки. Механическая прочность и оптимальный размер частиц являются ключевыми факторами, определяющими уровень пылеобразования в доменном производстве.

Крупные куски сырья, достигающие 100-300 мм, подвергаются самоизмельчению при перегрузках, что приводит к образованию значительного количества мелких пылевидных частиц. Содержание таких частиц агломерата размером менее 5 мм может достигать от 15 % до 17% и более при загрузке в доменную печь [9]. Это не только снижает эффективность доменной плавки и

увеличивает расход кокса, но и способствует выносу этих частиц горячими доменными газами в атмосферу из-за их небольшого веса, что особенно заметно на колошнике печи при загрузке шихты из скиповых подъёмников.

Снижение качества шихты также обусловлено наличием крупных кусков [10]. Они требуют больше времени на просушку, нагрев, удаление летучих веществ и восстановление из-за обилия дефектов, крупных пор и плохо спекшейся структуры. Это, в свою очередь, ухудшает условия их прогрева и восстановления по сравнению с мелкими фракциями.

Исследования показывают, что из столба шихтовых материалов в основном выносятся железорудные частицы размером до 2,3 мм [11], что напрямую связано с крупностью кусков. В развитых странах, таких как Япония, США, Франция, Италия и Германия, для доменной плавки преимущественно используется железорудный материал размером 5–35 мм, при этом содержание фракции 0–5 мм в загрузке не превышает 5–7 % [11]. Это обеспечивает не только снижение выбросов пыли, но и повышение технико-экономических показателей доменной печи. За рубежом агломерат подвергают двухступенчатому дроблению и многократному (4–5 раз) просеиванию, однако эффективность этих процессов также оставляет желать лучшего [11, 12].

Учитывая огромные объёмы производства агломерата (миллионы тонн в год), стабилизация гранулометрического состава и получение фракции размером 5–50 мм (оптимально 10–60 мм) является актуальной задачей. Помимо экологических преимуществ, экономическая выгода заключается в том, что снижение содержания фракции 0–5 мм на 1% увеличивает производительность доменной печи на 0,4–0,7 % и снижает расход кокса на 0,4–0,7 %. Уменьшение доли мелкой фракции (0–5 мм) в агломерате с 14,8 до 10,6 % повышает интенсивность плавки на 1,7–2,3 % [8].

Известно, что использование извести, полученной в циклонной печи и имеющей размер частиц 3–0 мм, при одинаковой степени обжига увеличивает скорость спекания агломерата на 6–7 % и уменьшает выход фракции менее 0,5 мм на 7–8 % [8].

Существует критический порог удельной поверхности извести, превышение которого существенно замедляет улучшение характеристик окомкования шихты. Эта величина обратно пропорциональна крупности компонентов шихты. Введение 3% извести в шихту, состоящую исключительно из концентрата, приводит к увеличению вертикальной скорости спекания на 37%, а также повышает выход качественного агломерата на 64%. При добавлении 2% извести в шихту с 30% содержанием концентрата, производительность возрастает на 25%, однако при снижении концентрата до 20%, аналогичное количество извести увеличивает производительность процесса всего на 15,7% [13].

Сложные условия производства агломерата, характеризующиеся высокой температурой, запылённостью и загазованностью, а также ограниченностью вмешательства в непрерывный процесс, затрудняют применение научных исследований непосредственно в производстве. Это подчёркивает

возрастающую роль современных методов научных исследований в данной области.

Таким образом, достижение оптимальных показателей возможно только при условии детальной проработки и решения следующих задач:

- изучение вспомогательных технологических процессов, влияющих на прочность агломерата и качество фракционного состава шихтовых материалов;
- анализ научно-технической литературы, патентной документации и конструкторских разработок;
- исследование фракционного и химического состава агломерата и компонентов шихты;
- оценка энергозатрат на дробление и измельчение;
- математическое моделирование процессов диспергирования;
- анализ технологических процессов дробления и измельчения;
- выявление зависимостей между основными факторами и технико-экономическими показателями процессов дробления и измельчения на основе математических моделей;
- оптимизация параметров процессов дробления и измельчения с применением современных математических методов, включая теорию многофакторного планирования экспериментов; анализ полученных результатов исследований;
- совершенствование конструктивных параметров дробильного оборудования; разработка конструкторской документации на модернизированные узлы и детали дробильно-измельчительных машин;
- проведение промышленных испытаний процессов измельчения извести и дробления агломерата;
- разработка рекомендаций по проектированию оборудования для агломерационного производства;
- совершенствование технологических процессов диспергирования;
- разработка компьютерных программ для расчёта оптимизированных параметров;
- разработка новых способов и конструкций для улучшения процессов подготовки извести и агломерата;
- оценка экономической эффективности внедрения новых решений.

Реализация указанных мероприятий позволит снизить энергопотребление на дробление агломерата на 3–7%, стабилизировать его фракционный состав, повысить производительность доменной печи на 8–14%, сократить расход кокса на 6–10% и уменьшить выбросы пыли в окружающую среду.

Литература:

1. Мусихина, Т.А. Экологические аспекты Киотского протокола / Т.А. Мусихина, А.П. Российский // Наука – производство – технологии – экология: Сборник материалов: в 5 томах. – Киров: Вятский государственный университет, 2004. – С. 152–153.

2. Мороз, В.В. Перспективы повышения эффективности доменной плавки путем стабилизации фракционного состава дробленого агломерата / В.В.

Мороз, Э.П. Левченко, О.А. Левченко // Современная наука: исследования, технологии, проекты: Сборник V международной научно-практической конференции. – Москва: Научный центр «Олимп», 2015. – С. 484–489.

3. Левченко, О.А. Повышение эффективности дробления агломерата путем усовершенствования конструктивных параметров одновалковой зубчатой дробилки: специальность 05.04.00 «Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Левченко Оксана Александровна. – Донецк, 2009. – 22 с.

4. Мороз, В.В. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке / В.В. Мороз, Э.П. Левченко, Н.А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2016. – С. 271–275.

5. Мороз, В.В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки / В.В. Мороз, В.И. Рубежанский, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – № 7(50). – С. 153–158.

6. Власенко, Д.А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Вестник ДонНТУ. – 2018. – № 3(13). – С. 9–16.

7. Левченко, О.А. Комплексные направления повышения качества агломерата и защиты природной среды / О.А. Левченко // Экология и промышленность России. – 2006. – № 1. С. 27–29.

8. Левченко, О.А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата / О.А. Левченко, Э.П. Левченко, А.М. Зинченко, В.В. Мороз. – Алчевск: ДонГТУ, 2016. – 190 с.

9. Власенко, Д.А. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет: Учебное пособие для студентов / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, А.П. Жильцов, А.А. Харитоненко. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2023. – 140 с.

10. Левченко, Э.П. Проектирование гидропривода дробильно-измельчительных машин: Учебник для студентов / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, В.Г. Чебан [и др.]. – Алчевск: Донбасский государственный технический институт, 2022. – 316 с.

11. Борискин, И.К. Интенсивная механическая обработка агломерата. теория, оборудование, технология / И.К. Борискин, Г.А. Арыков, А.Н. Пыриков. – М.: МИСИС, 1998. – 248 с.

12. Готлиб, А.Д. Доменный процесс / А.Д. Готлиб. – М.: Металлургия, 1966. – 504 с.

13. Савельев, С.Г. Применение в агломерационной шихте извести разной степени обжига. / С.Г. Савельев, Р.Д. Каменев, О.Г. Федоров и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1980. – № 3. – С. 24–26.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕРЫ В УГЛЕ

Платова О.К., Ошовский В.В.

Донецкий национальный технический университет

Содержание серы в земной коре составляет около 0,05%, что делает ее 15-м по распространенности элементом на планете. Она необходима растениям и животным, поскольку входит в состав различных аминокислот, коферментов и витаминов. Однако содержащиеся в нём газообразные соединения H_2S и SO_2 очень токсичны. Последний газ выделяется в больших количествах при сжигании ископаемого топлива и минерального угля и в значительной степени способствует возникновению кислотных дождей. Снижение содержания серы в топливе в настоящее время является одним из крупнейших международных проектов, направленных на улучшение качества воздуха, и это должно уменьшить воздействие SO_2 на окружающую среду.

Содержание серы является одним из ключевых параметров, определяющих качество угля. Высокое содержание серы снижает ценность угля как топлива. Например, содержание серы в угле влияет на качество кокса, используемого в металлургической промышленности, так как высокое содержание серы в коксе может ухудшить качество стали, сделать его более хрупким. Также оксиды серы, образующиеся при сжигании угля, могут вызывать коррозию котельного оборудования, трубопроводов и другого оборудования на электростанциях и промышленных предприятиях. Определение содержания серы позволяет оценить риск коррозии и принять меры для защиты оборудования.

Существует множество методов определения содержания серы в угле, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Рассмотрим наиболее известные методы.

Метод Эшка (Гравиметрический метод)

Гравиметрический метод определения общего содержания серы по методу Эшка заключается в сжигании куска угля путём спекания смесью оксида магния и безводной карбонатной соды, смесью Эшка, в окислительной атмосфере при 800°C . В этих условиях органическое вещество топлива сгорает, а сера превращается в сульфаты натрия и магния. Полученные сульфаты переходят в раствор. Были предложены два альтернативных метода растворения сульфатов натрия и магния: в горячей воде или соляной кислоте. Сульфат-ион количественно осаждается в среде соляной кислоты с хлоридом бария в форме сульфата бария. Исходя из массы осадка BaSO_4 , рассчитывается общее содержание серы в угле.

Сульфаты, содержащиеся в древесном угле, могут переходить в агломерат без изменения или обменной реакции с карбонатом натрия. В обоих случаях сульфаты попадают в раствор во время выщелачивания.

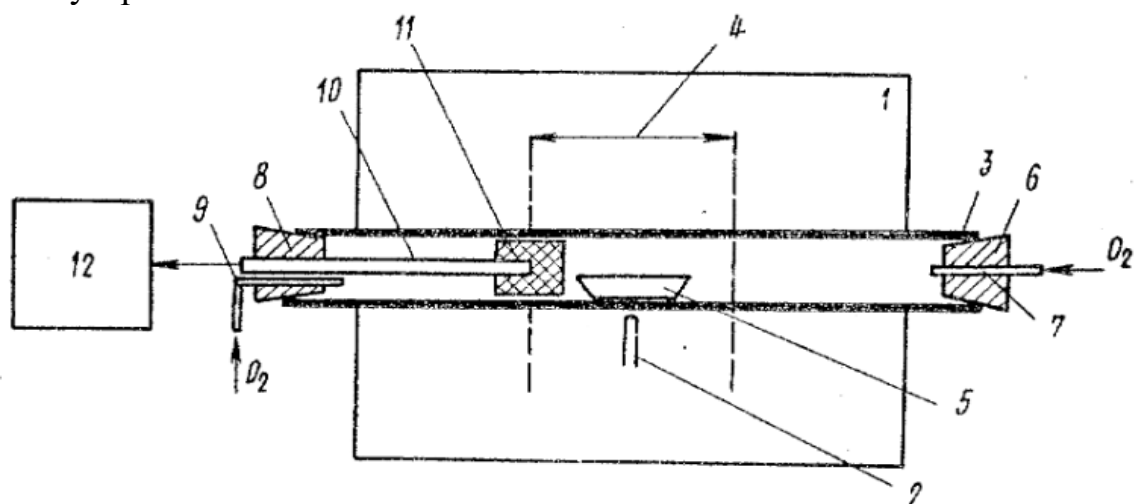
Пирит начинает разлагаться в присутствии кислорода при $400-500^\circ\text{C}$, и SO_2 полностью поглощается нагретой зольной смесью. Органическая масса угля, а вместе с ней и органических соединений серы, начинает разлагаться при

значительно более низких температурах, чем пирит. Если выделению серосодержащих летучих соединений не предшествовало хотя бы частичное окисление, продукты разложения могут проходить через слой смеси золы, не взаимодействуя с MgO и Na_2CO_3 .

Метод является относительно простым и доступным. Но при определении серы методом Эшка большое значение имеет три недостатка: длительность определения (не менее 6–7 ч), метод требует чистых импортных реактивов (химически чистой перекиси водорода, химически чистых углекислого натрия, магнезии, хлористого бария и большого количества химической посуды) и возможность потери части органической серы при спекании со смесью Эшка.

Метод определения с использованием специального устройства, содержащего высокотемпературный фильтр

В данном методе применяется специальное устройство, содержащее электрическую печь с трубой сжигания, термопарой, входной и выходной пробками, с закрепленными в них соответственно входной и выходной трубками, и абсорбер, дополнительно содержащий фильтр из пористого огнеупорного материала, укрепленный на конце выходной трубки, расположенном в высокотемпературной зоне печи. На рис. 1 приведена схема данного устройства.



1 - электрическая печь, 2 - термопара, 3 - труба сжигания, 4 - высокотемпературная зона, 5 - лодочка с анализируемым веществом, 6 - входная пробка, 7 - входная трубка, 8 - выходная пробка, 9 - выходная трубка, 10 - сменная выходная кварцевая трубка, 11 - фильтр из пористого огнеупорного материала, 12 - абсорбер.

Рисунок 1 — Принципиальная схема устройства

Устройство работает следующим образом. Сначала удаляется входная пробка, и в центр высокотемпературной зоны печи (1250–1350°C, контролируемой термопарой) помещается лодочка с образцом. Затем входная пробка устанавливается на место. Через входную и выходную трубки в печь подается кислород, обеспечивая полное сгорание образца. Образовавшийся в процессе горения диоксид серы (SO_2) проходит через фильтр, выходную

кварцевую трубку и выходную пробку и направляется в абсорбер. В абсорбере происходит поглощение SO_2 поглотительным раствором с известным начальным значением pH. Измеряется количество электричества, необходимое для восстановления исходного значения pH раствора. Это количество электричества пропорционально массовой доле серы в образце.

Важной особенностью устройства от остальных методов является наличие высокотемпературного фильтра, который задерживает мелкодисперсные частицы и летучие компоненты, образующиеся при сгорании. Расположение фильтра в высокотемпературной зоне обеспечивает дожигание осевших частиц, предотвращая потери серы и, следовательно, занижение результатов анализа из-за выноса несгоревших частиц.

Но, несмотря на наличие фильтра, устраняющего потери серы из-за выноса несгоревших частиц, этот метод по-прежнему имеет ряд ограничений и требует тщательного выполнения всех этапов анализа для получения точных и достоверных результатов. Современные методы, такие как сжигание в кислороде с последующим ИК-детектированием, обычно обеспечивают большую точность, скорость и удобство анализа.

Метод определения содержания серы с использованием прямого отбора твёрдых проб и молекулярно-абсорбционной спектроскопии

Содержание серы в угле определяется методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии с высоким разрешением и непрерывным источником спектра (HR-CS-FAAS), используя пламя ацетилен-воздух.

Для анализа использовался атомно-абсорбционный спектрометр ContrAA 700, оснащённый ксеноновой короткодуговой лампой в качестве источника непрерывного излучения. Данный прибор представляет собой компактный двухэшелонный монохроматор высокого разрешения. Измерения проводятся на длине волны 258,056 нм. Все измерения выполняются в трёх повторениях.

Для разложения угля применяется микроволновая система разложения Torwave с тефлоновыми сосудами объемом 50 мл. Вся стеклянная и полиэтиленовая посуда, используемая для приготовления растворов, предварительно замачивалась на ночь в 10%-ном растворе HNO_3 и тщательно промывалась сверхчистой водой для предотвращения загрязнения.

Перед анализом образцы высушиваются в вентилируемой печи при 50°C в течение 12 часов, затем охлаждаются над силикагелем и хранятся в плотно закрытых полиэтиленовых контейнерах. Каждый образец угля (около 0,2 г) измельчается вручную в агатовой ступке, точно взвешивается и растворяется в микроволновой печи с использованием 10 мл концентрированной HNO_3 .

Результаты представляются как среднее значение не менее трёх независимых определений для каждого образца, что подразумевает трёхкратное разложение каждого образца.

Способ определения содержания серы в угле с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии включает озоление (сжигание) угля, экстракцию и концентрирование серы, что увеличивает время анализа и требует

высококвалифицированного персонала; состав образца может оказывать существенное влияние на результаты анализа, что требует тщательной калибровки и применения методов коррекции (например, использование стандартных образцов с близким составом). Создание подходящих калибровочных стандартов сложен, так как состав анализируемых углей сильно варьируется.

Метод определения серы и углерода с использованием специального оборудования «Анализатор CS-3000»

«Анализатор CS-3000» для углерода и серы использует высокочастотную индукционную печь и четыре инфракрасных детектора для измерения содержания углерода и серы в образце независимо от их концентрации.

В основе работы лежит сжигание образца в керамическом тигле внутри индукционной печи. Выделяющиеся газообразные CO_2 и SO_2 измеряются с помощью инфракрасных датчиков. Весь процесс анализа занимает всего 40 секунд.

Программное обеспечение анализатора позволяет настраивать параметры сжигания (такие как температура и расход кислорода), контролировать и диагностировать систему, а также сохранять результаты. В режиме реального времени отображаются данные об образце и графики выделения углерода и серы. Программа также предоставляет инструменты для быстрой статистической обработки данных с возможностью отображения и печати результатов.

Компьютер автоматически вычисляет массовую долю углерода и серы (%C и %S) на основе интегральной площади пиков, массы образца, поправочного коэффициента и значения холостого опыта. Значение холостого опыта определяется заранее и вычитается из результата измерений.

Анализатор углерода и серы имеет функцию автоматической регулировки нуля. Перед каждым анализом образца прибор автоматически настраивает базовый уровень инфракрасного сигнала в заданном программным обеспечением диапазоне. Если эта регулировка не выполняется, анализ будет заблокирован.

Метод определения серы и углерода CS-3000 по сравнению с вышеперечисленными методами имеет свои преимущества. Метод позволяет проводить анализ значительно быстрее, чем метод Эшка. Это позволяет обрабатывать большое количество образцов в короткие сроки, что критически важно для промышленных лабораторий. Благодаря автоматизации и прецизионному оборудованию, CS-3000 обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов. Анализатор, как правило, прост в эксплуатации и требует минимальной подготовки оператора. Метод сжигания и ИК-детектирования обладает высокой чувствительностью, что позволяет точно определять содержание серы даже в углях с низким содержанием этого элемента. Благодаря автоматизации и закрытой системе снижается риск контакта оператора с опасными химическими веществами

Выводы

Современные методы определения серы в твердых горючих ископаемых способствуют улучшению экологической ситуации благодаря многим аспектам. Современные методы позволяют быстро и с высокой точностью контролировать содержание серы в угле, обеспечивают точные данные о содержании серы, что позволяет предприятиям соблюдать экологические стандарты и нормы и способствуют снижению выбросов вредных веществ и предотвращению загрязнения окружающей среды, также автоматизированный процесс анализа снижает вероятность ошибок и загрязнений, связанных с человеческим фактором.

Таким образом, анализатор CS-3000 и аналогичные приборы для определения углерода и серы методом сжигания и ИК-детектирования, обеспечивая быстрый, точный и экологически чистый способ определения содержания серы, играет важную роль в улучшении экологической ситуации, способствуя сокращению выбросов загрязняющих веществ и оптимизации технологических процессов.

Литература:

1. ГОСТ 8606–2015 (ISO 334:2013). Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка: утвержден и введен в действие Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 27.10.2015 № 81-П: дата введения 2017-04-01.
2. Патент SU890191A1, МПК G 01 N 25/14. Устройство для определения общего содержания серы в углеродсодержащих материалах / А.С. Беневольский, Ю.А. Иванов, В.А. Попов, В.В. Пичугин; Гос. комитет по делам изобретений и открытий. - № 2902986 ; заявл. 31.03.1980; опубл. 15.12.1981.
3. Baumbach, G. Determination of sulfur in coal by solid sampling graphite furnace high-resolution molecular absorption spectrometry / G. Baumbach, E. Jürgen // Microchemical Journal. – 2014. – p. 89-93.
4. Руководство по эксплуатации. Высокочастотный инфракрасный анализатор углерода и серы: - NCS TESTING TECHNOLOGY CO, LTD. – 39 с.

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Гапонов С.И., Ошовский В.В.

Донецкий национальный технический университет

Современный этап научно-технического прогресса характеризуется стремительным развитием нанотехнологий и широким внедрением углеродных наноматериалов в различные сферы человеческой деятельности. Эти уникальные материалы, к которым относятся углеродные нанотрубки, графен, фуллерены и другие углеродные наноструктуры, обладают исключительными физико-химическими свойствами, открывающими новые перспективы в электронике, медицине, энергетике и промышленном производстве. Однако параллельно с расширением областей применения этих перспективных материалов растет и озабоченность научного сообщества относительно их потенциального воздействия на окружающую среду и живые организмы.

Актуальность исследования экологических рисков углеродных наноматериалов обусловлена несколькими ключевыми факторами. Во-первых, нанометровый размер частиц (1-100 нм) придает им особые свойства, включая высокую удельную поверхность, повышенную химическую активность и необычные биологические эффекты, которые могут существенно отличаться от свойств объемных аналогов тех же веществ. Во-вторых, глобальный рынок наноматериалов демонстрирует экспоненциальный рост - по данным аналитиков, к 2030 году объем их производства может достичь сотен тысяч тонн ежегодно. В-третьих, особенности поведения наночастиц в окружающей среде изучены недостаточно, что затрудняет достоверную оценку долгосрочных экологических последствий их применения.

В свете этих вызовов комплексное изучение экологических рисков углеродных наноматериалов приобретает особую значимость. Необходимость такого исследования диктуется не только требованиями экологической безопасности, но и потребностями устойчивого развития нанотехнологий. Только глубокое понимание механизмов взаимодействия наноматериалов с компонентами экосистем позволит разработать эффективные стратегии минимизации их негативного воздействия, что в конечном итоге обеспечит безопасное использование огромного потенциала этих перспективных материалов.

Воздействие углеродных наноматериалов на водные экосистемы

Многочисленные научные исследования последних лет убедительно демонстрируют, что углеродные наноматериалы оказывают комплексное негативное воздействие на водные экосистемы, затрагивая все уровни биологической организации - от молекулярного до экосистемного. Наиболее чувствительными к воздействию этих веществ оказались представители зоопланктона, в частности дафнии (*Daphnia magna*). Проведенные эксперименты выявили четкую зависимость между концентрацией углеродных

нанотрубок в воде и смертностью этих организмов. При концентрации 1 мг/л наблюдается 50%-ная гибель популяции в течение 48 часов, тогда как увеличение концентрации до 5 мг/л приводит к 100%-ной смертности уже через 24 часа. При этом даже при относительно низких концентрациях (0,1 мг/л) отмечаются существенные нарушения репродуктивной функции и двигательной активности дафний, что может иметь долгосрочные последствия для всей водной экосистемы.

Для рыб, таких как популярный модельный объект *Danio rerio* (зебрафиш), характерны специфические реакции на воздействие углеродных наноматериалов. Графеновые пластины даже в относительно низких концентрациях (0,5 мг/л) вызывают значительные повреждения жаберного эпителия, что проявляется в увеличении слизистого секрета на 40-60% и снижении кислородной емкости крови на 25-30%. Эти изменения существенно ухудшают дыхательную функцию рыб и могут приводить к их гибели при длительном воздействии.

Особого внимания заслуживает поведение фуллеренов в водной среде. Эти углеродные наноматериалы образуют устойчивые коллоидные растворы (C_{60}), которые демонстрируют выраженную токсичность для водных микроорганизмов. Так, концентрация 10 мг/л подавляет рост цианобактерий на 70-80%, существенно снижает активность ключевых ферментов у водорослей *Chlorella vulgaris* и нарушает процесс фотосинтеза у высших водных растений. При этом важно отметить, что токсичность углеродных наноматериалов может значительно усиливаться в присутствии других загрязняющих веществ. Например, комбинация нанотрубок с тяжелыми металлами (медь, свинец) увеличивает токсический эффект в 2-3 раза, а адсорбция на поверхности наночастиц органических загрязнителей (полициклических ароматических углеводородов, пестицидов) создает дополнительные риски для водных экосистем.

Одной из наиболее серьезных проблем является способность углеродных наноматериалов к биоаккумуляции в водных организмах. Исследования показывают, что коэффициент накопления (BCF) в тканях моллюсков может достигать 5000-7000, а в рыбах концентрация углеродных нанотрубок нередко превышает их содержание в окружающей воде в 1000-1500 раз. Особенно тревожным является факт, что наблюдается четкая корреляция между длиной нанотрубок и степенью их накопления в организмах. Этот процесс биоаккумуляции приводит к явлению трофического переноса наноматериалов по пищевым цепям. Исследования модельных трофических цепей (водоросли → дафнии → рыбы → хищные виды) показывают, что на каждом последующем трофическом уровне концентрация наноматериалов увеличивается на 30-50%, достигая максимальных значений у хищников высшего порядка. Этот эффект биомагнификации создает серьезные риски для всей водной экосистемы и требует особого внимания при оценке экологической безопасности углеродных наноматериалов.

Влияние на почвенные экосистемы

Попадание углеродных наноматериалов в почву приводит к глубоким и разнообразным изменениям в почвенных экосистемах, затрагивающим как абиотические компоненты, так и биологическую составляющую. Особенно чувствительной к воздействию наноматериалов оказывается почвенная микрофлора. Многочисленные исследования свидетельствуют о значительном снижении численности и функциональной активности почвенных микроорганизмов, особенно азотфиксирующих бактерий, популяция которых может сокращаться на 60-80%. Это сопровождается снижением активности ключевых почвенных ферментов, в частности дегидрогеназ, на 40-50%, что существенно нарушает процессы трансформации органического вещества и циклы биогенных элементов в почве.

Воздействие углеродных наноматериалов на растения проявляется в различных физиологических нарушениях. Проведенные исследования с сельскохозяйственными культурами (в частности, с пшеницей) показали, что при концентрации углеродных нанотрубок 100 мг/кг почвы рост корневой системы сокращается на 40%. При этом отмечается увеличение проницаемости клеточных мембран в 2-3 раза, что приводит к нарушениям транспорта воды и питательных веществ. Эти изменения могут существенно снижать продуктивность сельскохозяйственных растений и ухудшать качество урожая.

Степень воздействия углеродных наноматериалов на почвенные экосистемы определяется комплексом факторов, среди которых особое значение имеют характеристики самой почвы. Кислотность среды (pH) существенно влияет на поведение наночастиц - максимальная токсичность наблюдается в кислых почвах (pH 4-5). Органическое вещество почвы, напротив, может снижать биодоступность наноматериалов, связывая их и уменьшая вредное воздействие. Важную роль играет также гранулометрический состав почвы и содержание глинистых частиц. Свойства самих наноматериалов, такие как размер и форма частиц, степень их функционализации и агрегационное состояние, также существенно влияют на их поведение в почве и воздействие на почвенные организмы. Например, длинные углеродные нанотрубки оказывают более выраженное негативное воздействие по сравнению с короткими, а функционализированные формы могут демонстрировать иной характер взаимодействия с почвенными компонентами по сравнению с нефункционализированными аналогами.

Методы снижения экологических рисков

Для эффективного снижения экологических рисков, связанных с углеродными наноматериалами, необходим комплексный подход, включающий технологические, организационные и нормативно-правовые меры. На технологическом уровне первостепенное значение имеет разработка и внедрение более безопасных методов синтеза наноматериалов. В частности, использование лазерной абляции вместо традиционного химического осаждения из паровой фазы позволяет существенно снизить образование токсичных побочных продуктов. Большие перспективы имеет разработка

биоразлагаемых покрытий на основе природных полимеров, таких как хитозан, которые могут заменить традиционные материалы на основе устойчивых нанотрубок.

Совершенствование систем очистки промышленных выбросов и сточных вод является важным направлением минимизации экологических рисков. Наиболее эффективными оказываются комбинированные системы, сочетающие многоступенчатые мембранные фильтры, электрохимические методы очистки и биосорбционные технологии. Особого внимания требует разработка специальных методов утилизации изделий, содержащих наноматериалы, которые должны предотвращать их попадание в окружающую среду на всех этапах жизненного цикла продукции.

Важнейшую роль в управлении рисками играет нормативное регулирование. В Европейском Союзе система REACH требует обязательной регистрации наноматериалов, производимых в количестве более 1 тонны в год, и проведения комплексной оценки их безопасности. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) устанавливает строгие лимиты выбросов для предприятий, работающих с наноматериалами. В России действует ГОСТ Р 58301-2019, устанавливающий требования безопасности в нанотехнологиях, а в Китае - национальный стандарт GB/T 33243-2016. Международные организации, такие как OECD, разрабатывают унифицированные руководства по тестированию и оценке безопасности наноматериалов (OECD Guidelines for Testing of Chemicals).

Перспективными направлениями в области снижения экологических рисков являются разработка биоразлагаемых аналогов углеродных наноматериалов, создание систем цифрового моделирования их миграции в окружающей среде, применение методов фиторемедиации с использованием генетически модифицированных растений и внедрение систем раннего экологического мониторинга. Эти меры в комплексе позволяют минимизировать негативное воздействие углеродных наноматериалов на окружающую среду и здоровье человека при сохранении всех преимуществ их использования в различных отраслях промышленности и технологий.

Литература:

1. Тунакова Ю.А., Котелевцев С.В., Хрипунов И.А. Экоотоксикологическая оценка углеродных наноматериалов в водных экосистемах // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 5. – с. 50-55.
2. Петрова Е.В., Иванов А.А. Биоаккумуляция углеродных наноматериалов в водных пищевых цепях // Водные ресурсы – 2019. – Т. 46, № 3. – с. 312-320.
3. Кузнецов В.В., Токсическое действие графеновых материалов на почвенные микроорганизмы // Микробиология. – 2020. – Т. 89, № 2. – с. 178-186.
4. ГОСТ Р 58476 – 2019 «Нанотехнологии. Оценка безопасности наноматериалов в почвенных экосистемах». – М.: Стандартинформ, 2019. – с. 28.

ОХРАНА ТРУДА ТЕРМИСТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА УСТАНОВКАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Сахаров А.С., Крымков В.Н.

Донецкий национальный технический университет

Термическая обработка и другие технологические процессы (нагрев под деформацию, сварка, пайка, сушка и т.п.) с индукционным нагревом широко применяются в различных отраслях. Это объясняется целым рядом преимуществ, по сравнению с другими способами нагрева: высокий КПД, использование «чистой» энергии, высокая технологичность и способность к автоматизации.

Индукционный нагрев основан на явлении электромагнитной индукции, в результате которого в поверхностном слое проводника, помещенного в переменное магнитное поле, генерируются вихревые токи Фуко. Таким образом, наличие переменного магнитного поля является необходимым фактором, имеющим место при любой частоте используемого в индукторе тока – от промышленной, до мегагерцовой.

Перенос энергии магнитным полем, в той или иной степени, затрагивает и работающий на подобных нагревательных установках персонал. Причем в ряде случаев удалить работника на безопасное расстояние бывает очень сложно. Например, при пайке работник, как правило, вручную вносит изделие в индуктор и попадает в область действия поля.

Необходимо отметить, что источником вредных факторов могут быть не только индукторы, но и проводники с током, генераторы и т.п.

Рассмотрим, в чем же проявляется действие электромагнитных полей (ЭМП) на человека. Как уже было указано, действие ЭМП связано с передачей энергии живым тканям. Взаимодействие внешних ЭМП с биологическими объектами происходит путём наведения внутренних полей и электрических токов, величина и распределение которых в теле человека зависит от ряда параметров – размер, форма, анатомическое строение тела, электрические и магнитные свойства тканей (диэлектрическая и магнитная проницаемость и удельная проводимость), ориентация тела относительно векторов электрического и магнитного полей, характеристик ЭМП (частота, интенсивность, модуляция, поляризация и др.). Низкочастотные электрическое и магнитное поля создают в теле человека наведенные токи.

Основной величиной, определяющей степень воздействия, является плотность наведенного в теле вихревого тока. При этом для электрического поля (ЭП) характерно слабое проникновение в тело человека, для магнитного поля (МП) организм практически прозрачен. Основным механизмом биологического действия МП являются вихревые токи, которые индуцируются им в теле человека. При этом реакции организма имеют неспецифический характер, проявляющийся в возникновении изменений функционального состояния нервной, сердечно-сосудистой, иммунной систем.

Плотность наведенного в теле вихревого тока (j) может быть рассчитана по формулам:

$$j = k \cdot f \cdot E,$$
$$j = \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot f \cdot B$$

где f – частота;
 E – напряжённость ЭП;
 k – коэффициент для различных тканей;
 B – магнитная индукция;
 σ – проводимость ткани;
 R – радиус биообъекта

С возрастанием частоты ЭМП правильнее использовать другую характеристику воздействия полей на организм – удельную поглощенную энергию (энергетическую экспозицию), выражаемую в Вт/см².

Хотя ощущаемые эффекты от ЭМП проявляются заметнее при росте частоты поля, они одинаковы для всех переменных полей.

Одним из ранних проявлений биоэффектов ЭМП разных интенсивностей и частотных диапазонов являются реакции, связанные с прямым либо опосредованным действием фактора на центральную нервную систему. При действии ЭМП проявляются зрительные, слуховые, тактильные, тепловые и другие эффекты. При облучении микроволнами области спины и затылочной части головы отмечены повышение возбудимости зрительного анализатора и изменение зрительной функции. При длительном воздействии ЭМП разных частот невысоких интенсивностей отмечены повышение порога температурной чувствительности и снижение количества активных тепловых точек на действие теплового раздражителя. Следствием этого могут быть нарушение координации движения, тремор пальцев рук, нарушения сна. При хроническом воздействии ЭМП чаще всего отмечаются астенический, переходящий в астеновегетативный, синдром с невротическими расстройствами, повышенная утомляемость, эмоциональная неустойчивость, подавленное настроение, чувство тревоги, ослабление памяти и внимания, головные боли, изменение сердечной деятельности, биопотенциалов мозга, функции щитовидной железы, снижение половой потенции и др. Имеют место функциональные изменения нервной и сердечно-сосудистой систем в форме вегетативной дисфункции (тахи- или брадикардия, артериальная гипертензия, лабильность пульса, гипергидроз), изменения тонуса сосудов головного мозга, состава периферической крови (умеренная тромбоцитопения, нейтрофильный лейкоцитоз, моноцитоз, ретикулопения), нарушения соотношения иммунорегуляторных клеток, угнетении гуморального звена иммунитета. Наблюдается резкое снижение трудоспособности [1-3].

Гигиеническое нормирование пребывания работников в условиях воздействия переменного магнитного промышленной частоты осуществляется в соответствии с санитарными нормами и правилами [4]. Для переменного МП промышленной частоты устанавливается предельный уровень напряженности

или индукции поля (табл. 1). Для МП более высокой частоты нормируется как энергетическая экспозиция, так и напряженность ЭП и МП. Однако с ростом частоты более 30 кГц, ПДУ напряженности поля резко снижается.

Таблица 1 – ПДУ периодического МП частотой 50 Гц

Длительность пребывания, ч	Допустимые уровни МП, Н [А/м]/В [мкТл] при воздействии	
	общем	локальном
<1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Поскольку при индукционном нагреве токами повышенной частоты (ТВЧ) применяются, в основном, частоты порядка нескольких кГц, то наибольшие сложности вызывает именно защита от магнитной составляющей ЭМП.

В настоящее время методы защиты персонала от вредного воздействия ЭМП можно классифицировать по следующим группам:

- организационные мероприятия;
- применение коллективных и индивидуальных средств защиты;
- лечебно-профилактические мероприятия.

Учитывая специфику работы термистов, стоит подробнее остановиться на первых двух группах.

Организационные мероприятия, в большинстве случаев включают меры, которые можно назвать «защитой временем и расстоянием» [5]. Как следует из табл. 1, снижение времени нахождения в зоне ЭМП равносильно снижению вредного воздействия. Таким образом, разработка оптимальных графиков работы термистов в значительной степени снижает вредное воздействие ЭМП.

Вторая группа организационных мероприятий – удаление человека из зоны действия ЭМП. Это достигается, прежде всего, увеличением расстояния между органами управления индукционными установками и индуктором. Однако увеличение расстояния не всегда возможно. Например, пайка режущего инструмента до сих пор производится вручную.

Наиболее эффективным способом удаления человека является автоматизация труда термиста. Однако полная автоматизация процессов термообработки достигнута только на отдельных массовых производствах.

В ряде случаев улучшение условий труда достигается снижением интенсивности излучения. Это может быть реализовано несколькими способами:

- снижением силы тока в индукторе. Это должно компенсироваться увеличением длительности нагрева, изменением схемы обработки и конструкции индуктора;
- регулировкой электроустановок для снижения мощности;
- применением защитных экранов и экранирование токоподводящих шин.

Защитные экраны могут быть достаточно эффективным средством, которое заметно снижает напряженность, по крайней мере, электрической составляющей ЭМП. Применяются экраны двух видов:

- отражающие. Эти экраны изготавливают из металлических листов, фольги или сеток. Реже – из металлизированных диэлектриков.

- поглощающие. Они изготавливаются из радиопоглощающих материалов. Как правило, это композиты. В качестве основы используют каучук, поролон, пенополистирол, пенопласт, металлокерамические композиции и т.д. В виде добавок применяют сажу, активированный уголь, карбонильное железо и т.п.

Переменные МП низкой частоты – до 3 кГц, поглощаются слабо. Поэтому в этом случае целесообразно применять отражающие экраны с высоким значением магнитной проницаемости. Например, стальные.

С увеличением частоты более эффективны поглощающие экраны из меди или латуни.

Кроме металлических на практике для изготовления экранов широко применяют композитные материалы:

- прозрачные экраны, которые изготавливаются из стекол с токопроводящими покрытиями. В качестве таковых чаще всего используют плёнки из окиси олова, наносимые на поверхность стекол;

- радиопоглощающие материалы. В этих целях используется феррит, древесное волокно, резина и др.;

- электропроводимые клеи на основе эпоксидных смол с наполнителем из тонкодисперсных металлических порошков (железа, никеля, кобальта);

- многослойные экраны из различных материалов (в диапазоне частот 10 кГц – 100 МГц наиболее целесообразным является сочетание медного (20 %) и стального (80 %) слоёв).

Литература:

1. Аполлонский, С. М. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: учебное пособие / С. М. Аполлонский, Т. В. Каляда, Б. Е. Синдаловский. – Санкт-Петербург: Политехника, 2006. – 263 с.

2. Куренкова, Г. В. Электромагнитные поля и излучения в производственных условиях. Вопросы гигиенической оценки и профилактики: учебное пособие / Г. В. Куренкова. – Иркутск: ИГМУ, 2022. – 107 с.

3. Тряпицына, Е.В. Влияние электромагнитных полей на организм человека // Интерактивная наука. – 2024. - №1 (87). – С. 19-21.

4. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 28 января 2021 г. N 2. – Москва: Детство-Пресс, 2021. – 988 с.

5. Пальцев, Ю.П. Современные принципы и средства защиты работников от неблагоприятного воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона / Ю.П. Пальцев, Л.В. Походзей, Н.Б. Рубцова, С.Ю. Перов, О.В. Белая // Гигиена и санитария. – 2017. – 96 (5). – С. 451-455.

3D-ПЕЧАТЬ КОМПОЗИТАМИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ ТРАДИЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРБОНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Бочинский Р.Ю., Ошовский В.В.

Донецкий национальный технический университет

Изделия, благодаря своим уникальным свойствам – высокой прочности при малом весе, коррозионной стойкости и жесткости – находят широкое применение в авиации, автомобилестроении, спортивном оборудовании и других отраслях.

В последние годы 3D печать из композитных материалов стала перспективной альтернативой, и в данном докладе мы рассмотрим, возможно ли заменить традиционные методы производства карбоновых изделий с помощью этой технологии.

3D печать, или аддитивное производство, включает в себя создание объектов путем послойного нанесения материала. Существует несколько технологий 3D печати, которые могут быть использованы для создания карбоновых изделий, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки

FDM (Fused Deposition Modeling) с композитными нитями: Нити, состоящие из термопластичного полимера, армированного углеродным волокном, экструдированы через сопло и послойно наносятся на платформу. Эта технология относительно проста и доступна, но имеет ограничения по содержанию волокна и анизотропии свойств.

Direct Ink Writing (DIW) или Direct Write: Специальные чернила, содержащие полимерную матрицу и армирующие волокна, наносятся непосредственно на платформу. Эта технология позволяет контролировать ориентацию волокон и создавать сложные структуры.

Continuous Fiber Fabrication (CFF): Непрерывные волокна, пропитанные термопластичным полимером, укладываются в заданном направлении, обеспечивая высокую прочность и жесткость.

Stereolithography (SLA) и Digital Light Processing (DLP) с композитными смолами: Жидкие смолы, содержащие армирующие частицы, отверждаются под воздействием ультрафиолетового света. Эта технология позволяет получать детали с высокой точностью и детализацией.

Метод производства композитов по средствам 3D-печати имеет ряд преимуществ над традиционными методами производства композитов:

Свобода дизайна: 3D-печать позволяет создавать детали сложной формы с внутренними полостями и сложной геометрией, что невозможно или затруднительно при использовании традиционных методов.

Сокращение времени производства: 3D-печать позволяет значительно сократить время производства, особенно для прототипов и мелкосерийных изделий.

Снижение затрат: 3D-печать позволяет снизить затраты на оснастку, материалы и оплату труда, особенно для сложных деталей и мелкосерийного производства.

Минимизация отходов: 3D-печать позволяет минимизировать отходы материала, так как материал используется только там, где это необходимо.

Персонализация и кастомизация: 3D-печать позволяет легко адаптировать дизайн под индивидуальные требования заказчика.

Оптимизация структуры: Возможность контролировать ориентацию волокон позволяет оптимизировать структуру детали для достижения максимальной прочности и жесткости при минимальном весе.

Экологичность: 3D-печать более экологична, по сравнению с традиционными методами производства композитных материалов, так как при производстве деталей не используются токсичные и опасные для природы вещества.

Несмотря на достаточно большое количество преимуществ у 3D-печати композитов есть и довольно существенные недостатки, которые могут влиять на качество конечной продукции.

Ограничения по размеру: Размер деталей, которые можно напечатать, ограничен размером рабочей области 3D-принтера.

Анизотропия свойств: Свойства материала, напечатанного на 3D-принтере, могут быть анизотропными, то есть зависеть от направления. Это связано с ориентацией волокон и слоистой структурой.

Пористость: В напечатанных деталях могут присутствовать поры, которые снижают прочность и жесткость.

Качество поверхности: Качество поверхности напечатанных деталей может быть хуже, чем у деталей, изготовленных традиционными методами.

Стоимость оборудования и материалов: 3D-принтеры для печати композитами и композитные материалы могут быть дорогими.

Ограниченный выбор материалов: Выбор композитных материалов для 3D-печати пока ограничен по сравнению с традиционными материалами.

Необходимость постобработки: Напечатанные детали часто требуют постобработки, такой как удаление поддержек, шлифовка и полировка.

3D-печать композитами может быть конкурентоспособной альтернативой традиционным методам в следующих случаях.

Прототипирование: 3D-печать позволяет быстро и недорого изготавливать прототипы для проверки дизайна и функциональности.

Мелкосерийное производство: 3D-печать позволяет экономически эффективно производить небольшие партии деталей, особенно сложных форм.

Персонализированные и кастомизированные изделия: 3D-печать позволяет легко адаптировать дизайн под индивидуальные требования заказчика.

Детали сложной формы: 3D-печать позволяет создавать детали сложной формы с внутренними полостями и сложной геометрией, которые невозможно или затруднительно изготовить традиционными методами.

Технология 3D-печати композитами продолжает развиваться быстрыми темпами. В будущем можно ожидать:

Развитие новых материалов: Появление новых композитных материалов с улучшенными свойствами и расширенным спектром применения.

Улучшение технологий печати: Разработка более точных и быстрых технологий печати, позволяющих создавать детали с лучшим качеством поверхности и меньшей пористостью.

Снижение стоимости оборудования и материалов: Снижение стоимости 3D-принтеров и композитных материалов, что сделает технологию более доступной.

Автоматизация процессов: Автоматизация процессов 3D-печати, включая подготовку данных, печать и постобработку, что позволит повысить производительность и снизить затраты.

Интеграция с другими технологиями: Интеграция 3D-печати с другими технологиями, такими как компьютерное моделирование и анализ, позволит создавать более сложные и оптимизированные детали.

Расширение областей применения: Расширение областей применения 3D-печати композитами в авиации, автомобилестроении, медицине, спорте и других отраслях.

В завершении можно сделать вывод 3D-печать композитами представляет собой перспективную технологию, которая может заменить традиционные методы производства карбоновых изделий в определенных областях.

3D-печати композитами есть свои ограничения, она предлагает ряд преимуществ, таких как свобода дизайна, сокращение времени производства, снижение затрат, минимизация отходов более экологически чистое производство.

По мере развития технологии 3D-печать композитами будет играть все более важную роль в производстве карбоновых изделий, особенно для прототипирования, мелкосерийного производства, персонализированных изделий и деталей сложной формы.

Литература:

1. Беляев, В.С. 3D-печать композитами: технология, материалы, применение / В.С. Беляев, А.А. Попов. – М.: Техносфера, 2020. – 240 с.
2. И.В. Аддитивные технологии в производстве изделий из композиционных материалов / И.В. Кривцун, А.А. Климов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 128 с.
3. Черных, В.В. Аддитивные технологии: основы, оборудование, материалы / В.В. Черных. – СПб.: Питер, 2015. – 288 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА

Довгаль А.А., Кочура В.В.

Донецкий национальный технический университет

Известно, что доменный газ (ДГ) имеет большую энергетическую ценность, но для того чтобы дальнейшее его использование стало возможным необходимо отделить от него колошниковую пыль, которая также имеет высокую сырьевую ценность и может использоваться в металлургическом производстве [1].

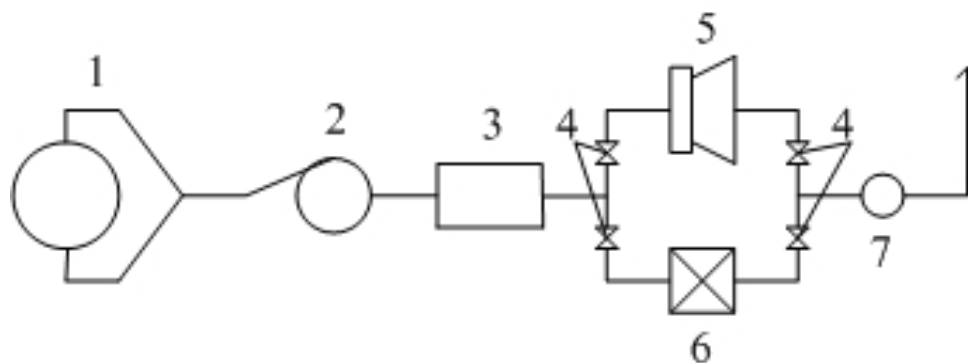
Усредненная величина удельного выхода ДГ при современном уровне производства составляет 2000-2500 м³/т чугуна [2]. В связи с большим содержанием в ДГ оксида углерода (до 32%) его повсеместно используют как топливо. Теплотворная способность ДГ составляет 3,5-4 МДж/м³. Количество химического тепла ДГ в общем балансе вторичных энергоресурсов на многих предприятиях достигает 80%. Помимо химического тепла, физическое тепло ДГ может составить в общем балансе 2-3%.

На металлургических предприятиях, как правило, применяют многоступенчатую систему очистки доменного газа, предусматривающую обеспыливание его до 4-10 мг/м³ не менее чем в трех-четырех последовательно установленных аппаратах, в том числе включающих мокрые газоочистки в виде скрубберов и труб Вентури [2, 3]. К сожалению, мокрая газоочистка снижает эффективность применения ДГ как источника вторичных энергоресурсов: из-за насыщения газа водяными парами его теплота сгорания снижается на 25-30 %; физическое тепло полностью теряется с водяными парами; применение газовой утилизационной бескомпрессорной турбины (ГУБТ) из-за наличия водяного пара и низкой эффективности очистки газов от пыли очень проблематично. В связи с этим актуален вопрос перевода доменных печей с мокрой газоочистки на сухую [4].

Отказ от использования для очистки ДГ воды позволит:

- увеличить выход и использование колошниковой пыли в связи с исключением образования шлама;
- исключить использование воды в системе газоочистки на 3-12 л/м³ [5, 6] очищаемого газа, что исключает или сокращает объемы строительства объектов водного хозяйства доменной печи: шламовой перекачивающей станции газоочистки, отстойников и флокулятора шлама, насосной станции перекачки пульпы, циркуляционной насосной станции оборотного цикла газоочистки и др.;
- повысить температуру нагрева воздушного дутья и использовать физическое тепло ДГ, т.к. при сухой газоочистке температура ДГ на 50-70 °С выше чем при мокрой;
- получить стабильную и эффективную работу ГУБТ для выработки электроэнергии.

На основе зарубежного опыта предлагается технологическая схема газоочистки для обеспыливания ДГ сухим методом (рис.1).



1 – доменная печь; 2 – циклон; 3 – электрофильтр или рукавный фильтр;
4 – заслонка; 5 – ГУБТ; 6 – дроссельная группа; 7 – коллектор чистого газа

Рисунок 1 – Схема сухой очистки доменного газа

Выполнены расчеты эффективности использования в качестве сухого способа газоочистки ДГ электрофильтра и рукавного фильтра применительно к условиям работы доменной печи объемом 1033 м³.

В расчетах принято: выход ДГ из печи при нормальных условиях – 150 тыс м³/ч; давление газа на выходе из печи – 1,3 атм; содержание колошниковой пыли в ДГ – 20 г/м³; плотность колошниковой пыли 3,5 т/м³ [5].

Гранулометрический состав колошниковой пыли приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав колошниковой пыли

Размер частиц, мкм	>200	200-100	100-60	60-20	20-10	10-1	<1
Содержание, % (по массе)	34,5	12,3	19,0	25,0	7,5	1,65	0,05

Для первой ступени очистки выполнен расчет циклона [5]. Степень очистки ДГ в циклоне, количество уловленной колошниковой пыли и количество выходящей из циклона неуловленной пыли приведено в табл. 2.

Таблица 2 – Показатели очистки газа в циклоне

Размер частиц пыли, поступающей в циклон, мкм	Содержание, %	Степень очистки в циклоне, %	Масса входящей в циклон пыли, кг/ч	Масса уловленной пыли, кг/ч	Масса неуловленной пыли, кг/ч
<1	0,05	50	1,5	0,75	750
1-10	1,65	58	49,5	28,71	20,79
10-20	7,5	77	225	173,25	51,75
20-60	25,0	94	750	705	45
60-100	19,0	97	570	552,9	17,1
100-200	12,3	100	369	369	-
>200	34,5	100	1035	1035	-
Всего	100	95,487	3000	2864,61	135,39

Гранулометрический состав колошниковой пыли после очистки в циклоне приведен в табл. 3.

Таблица 3 – Гранулометрический состав колошниковой пыли после очистки в циклоне

Размер частиц, мкм	100-60	60-20	20-10	10-1	<1
Содержание по массе, %	12,63	33,24	38,22	15,36	0,55

Выполнен расчет эффективности очистки ДГ в электрофильтре ЕГА. Техническая характеристика электрофильтра приведена в табл. 4 [5].

Таблица 4 – Техническая характеристика электрофильтра ЕГА

Площадь активного сечения, м ²	Общая площадь осаждения, м ²	Габаритные размеры, м			Масса, т
		длина	ширина	высота	
41,0	2360	13,44	6,2	15,4	121,12

Эффективность очистки ДГ в электрофильтре представлена в табл. 5.

Таблица 5 – Эффективность очистки в электрофильтре

Размер частиц, мкм	Содержание, %	Степень очистки, %
<1	0,55	17
1-10	15,36	80
10-20	38,22	99
20-60	33,24	100
60-100	12,63	100

Общая степень очистки составила 96%. Масса уловленной в электрофильтре пыли составила 129,974 кг/ч.

Для оценки альтернативного электрофильтру способу очистки выполнен расчет рукавного фильтра ФРИР [6]. Техническая характеристика фильтра представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Техническая характеристика рукавного фильтра ФРИР

Производительность по очищаемому газу, тыс. м ³ /ч	126-168
Удельная газовая нагрузка, м ³ /(м ² мин)	1,5-2
Площадь фильтрации, м ²	1400
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе, г/м ³	
на входе в фильтр	10
на выходе из фильтра, не более	0,02
Допустимая температура очищаемого газа, °С	135
Гидравлическое сопротивление фильтра, Па, не более	2500
Давление сжатого воздуха, МПа, не менее	0,6
Расход сжатого воздуха, м ³ /ч, не менее	80
Количество фильтровальных рукавов	648
Размер фильтровального рукава, мм	
диаметр внутренний	133
длина	5200
Масса фильтра, т	405

Количество уловленной в рукавном фильтре пыли при степени очистки 99 % составит 134,036 кг/ч.

Использование тех или иных аппаратов очистки имеет определенные преимущества и недостатки. Для того чтобы выбрать наиболее подходящий вариант очистки ДГ рассмотрим эффективность применения электрофильтра и рукавного фильтра.

Основными преимуществами электрофильтров является возможность очистки горячих газов с температурой до 600 °С, низкое гидравлическое сопротивление. Недостатком считается сложность и высокая стоимость, большие затраты электроэнергии.

Преимуществами рукавных фильтров является их высокая эффективность очистки (до 99%), невысокая чувствительность фильтров к фракционному составу. Среди недостатков отмечается быстрый износ материала фильтра, неравномерность гидравлического сопротивления в процессе работы, неравномерность очистки газа на протяжении некоторого времени после регенерации.

Таким образом, в результате теоретических исследований и расчетов эффективности очистки ДГ предложена сухая схема очистки газа от колошниковой пыли, предусматривающая замену форсуночного скруббера и трубы Вентури электрофильтром или рукавным фильтром. Предложенная схема позволяет отказаться от использования воды на очистку ДГ в указанных аппаратах мокрой очистки в количестве 3-12 л/м³ ДГ, что позволит увеличить количество улавливаемой легко утилизируемой сухой колошниковой пыли на 50 %, снизить затраты на обслуживание системы водоподготовки, повысить эффективность применения очищенного доменного газа.

Литература:

1. Вегман, Е.Ф. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, А.Ф. Похвиснев. – М.: Академкнига, 2004. – 756 с.
2. Андоньев, С.М. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии / С.М. Андоньев, О.В. Филиппев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1998. – 256 с.
3. Швыдкий, В.С. Очистка газов: Справочное издание / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
4. Осипенко, В.В. Сухая очистка доменного газа – новый этап развития предприятия черной металлургии / В.В. Осипенко, В.Д. Осипенко, В.И. Губанов // Сталь. – 2010. – №25. – С. 25–26.
5. Юдашкин, М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
6. Старк, С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1977.-328 с.

ОЧИСТКА ДОМЕННОГО ГАЗА ОТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА РАСТВОРОМ МОНОЭТАНОЛАМИНА

Печень Е.В., Кочура В.В.

Донецкий национальный технический университет

В черной металлургии в качестве вторичного энергоресурса широко используется доменный газ, образующийся при выплавке чугуна в количестве 2000-2500 м³/т чугуна и содержащий в своем составе до 32% оксида углерода [1]. Он является низкокалорийным топливом с теплотворной способностью 3,5-4 МДж/м³, которое обычно сжигают самостоятельно или в смесях с коксовым и природным газом в воздухонагревателях доменных печей, печах прокатных цехов, ТЭЦ-ПВЭС, обогревают коксовые батареи и др.

В доменном производстве проводятся теоретические и опытно-промышленные исследования по снижению удельного расхода кокса за счет вдувания в доменную печь очищенного от СО₂ и нагретого до 1000-1200 °С доменного газа [2]. При этом расход кокса сокращается на 30 % и увеличивается производительность доменной печи на 10-12%.

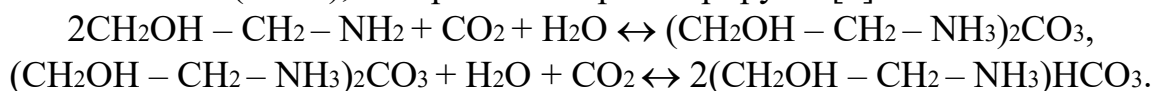
Для повышения эффективности использования доменного газа требуется снизить в нем содержание пыли до 4-10 мг/м³ и повысить содержание горючих компонентов.

Очистка от пыли в доменных цехах обычно производится на последовательно установленных трех-четырех очистных аппаратах: инерционных пылеуловителях, циклонах, полых скрубберах, трубах Вентури [3].

На практике наиболее широко отработаны технологии очистки газов от СО₂ в химической промышленности, в частности при синтезе аммиака, где концентрация СО₂ в газе после конверсии составляет 17-30 %. Полученный при этом диоксид углерода может быть использован в качестве сырья для получения различных продуктов, для создания инертной среды, при тушении пожаров.

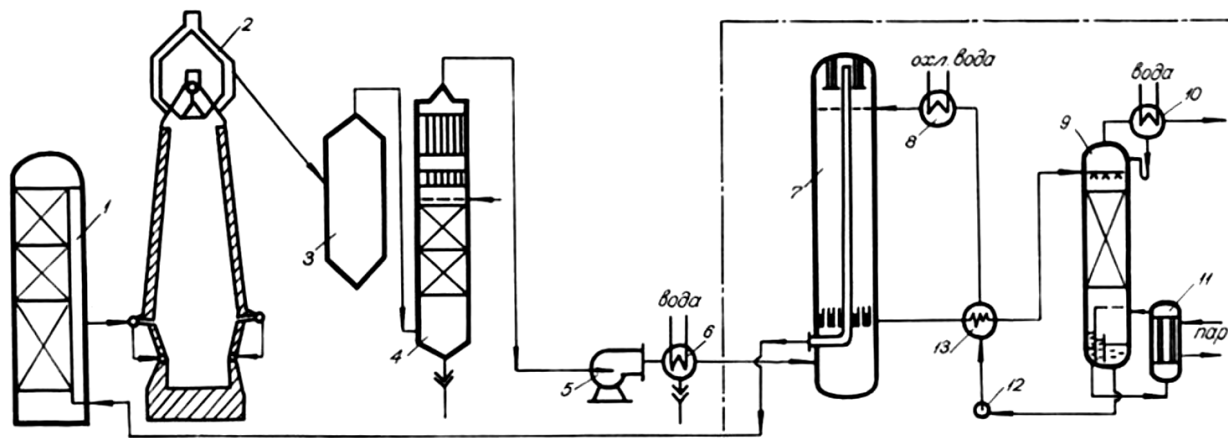
Наиболее распространенным методом удаления СО₂ из газов является их промывка водой под давлением [4]. Очистка водой используется при повышенном давлении 1–3 МПа. Расход воды на орошение – 0,1 м³/нм³ очищаемого газа, плотность орошения – 150–200 м³/м² поверхности аппарата в час. Степень очистки невысока – приблизительно 70–80%. В случае использования давления целесообразно проводить регенерацию СО₂ путём понижения давления поглотительного раствора в специальных аппаратах – регенераторах.

Также широко распространен в промышленности метод очистки газов от СО₂ органическими поглотителями – растворами этаноламинов, чаще всего моноэтаноламина (МЭА), которые легко регенерируют [5]:



Этаноламины хорошо растворимы в воде (максимальная концентрация – 50%), однако вызывают коррозию металлов, поэтому для ограничения коррозии на установках очистки применяют 15–20 % растворы этаноламинов.

Рассмотрим одноступенчатую моноэтаноломиновую очистку доменного газа, представленную на рисунке 1.



1 – газонагреватель; 2 – доменная печь; 3 – инерционный пылеуловитель; 4 – полый скруббер; 5 – газодувка; 6 – концевой охладитель газа; 7 – абсорбер; 8 – холодильник; 9 – десорбер; 10 – конденсатор; 11 – кипятильник; 12 – циркуляционный насос; 13 – рекуперативный теплообменник

Рисунок 1 - Цикл восстановительного газа с очисткой от диоксида углерода раствором моноэтанолamina

Доменный газ после грубой и тонкой очистки от пыли в аппаратах 3, 4 и охлаждения до температуры 20-40 °С сжимается до 0,53 МПа в газодувке и поступают на очистку в абсорбер 7, орошаемый 15-20 % раствором МЭА.

Здесь концентрация диоксида углерода снижается до 1-2 % (об.). После прохождения сепаратора и улавливания брызг в верхней части абсорбера очищенный газ направляется через газонагреватель 1 в доменную печь 2 на сжигание в качестве высококалорийного топлива.

Насыщенный раствор МЭА, нагретый за счет теплоты абсорбции до 40-65 °С, направляется в кожухотрубный теплообменник 13, где температура раствора повышается до 90-105°С, и затем поступает в регенератор (десорбер) 9. В процессе регенерации раствор, стекая сверху вниз по насадке колонны, нагревается восходящим потоком парогазовой смеси. Необходимое для регенерации раствора тепло выделяется при конденсации пара, который образуется в выносном кипятильнике 11. В качестве теплоносителя в кипятильнике используется энергетический пар низких параметров (от испарительного охлаждения). Парогазовая смесь, насыщенная диоксидом углерода, с температурой 97-105 °С поступает в конденсатор 10 (или скруббер-охладитель), где водяной пар конденсируется, а диоксид углерода охлаждается до 30-35 °С и может быть использован, например, для получения восстановительного газа [5]. Конденсат отводится на орошение трех- четырех

верхних тарелок регенератора.

Для доменной печи полезным объемом 1033 м³ выполнен расчет очистки доменного газа 18 % раствором МЭА. Количество доменного газа на выходе из печи составляет 150 тыс. м³/ч. Состав доменного газа приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав доменного газа

Компоненты	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	O ₂ +N ₂
Содержание, объемный %	11,3	29	0,2	4,30	55,2

Конечное содержание диоксида углерода в очищенном газе принимаем 1% по объему, что является достаточным для дальнейшего использования рециркулируемого газа в качестве восстановителя в доменной печи.

Количество диоксида углерода в доменном газе составляет:

$$V_{CO_2}^{дг} = \frac{V_{дг} \cdot V_{CO_2}}{100}; V_{CO_2}^{дг} = \frac{150000 \cdot 11,3}{100} = 16950 \frac{м^3}{ч}$$

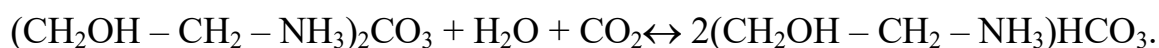
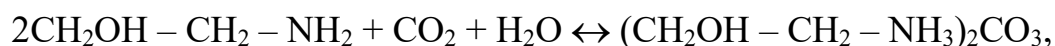
$$m_{CO_2}^{дг} = \frac{V_{CO_2}^{дг} \cdot M_{CO_2}}{22,4}; m_{CO_2}^{дг} = \frac{V_{CO_2}^{дг} \cdot M_{CO_2}}{22,4} = 33294,643 \text{ кг/ч}$$

Определим количество поглощенного раствором МЭА диоксида углерода:

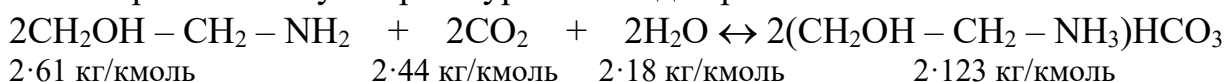
$$V_{CO_{2л}}^{полг} = V_{CO_2}^{дг} \frac{(C_{CO_2}^{дг} - C_{CO_2}^{зал})}{C_{CO_2}^{дг}}; V_{CO_{2л}}^{полг} = 16950 \frac{(11,3-1)}{11,3} = 15450 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$m_{CO_{2л}}^{полг} = \frac{15450 \cdot 44}{22,4} = 30348,214 \text{ кг/ч}.$$

Составим суммарное уравнение поглощения диоксида углерода раствором моноэтаноламина:



Принимаем суммарное уравнение для расчетов:



Определим количество МЭА, необходимое для поглощения CO₂:

$$m_{МЭА}^{полг} = m_{CO_2}^{полг} \frac{2M_{МЭА}}{2M_{CO_2}}; m_{МЭА}^{полг} = 30348,214 \frac{2 \cdot 61}{2 \cdot 44} = 42073,66 \text{ кг/ч};$$

$$m_{\text{МЕА}_{p-n}}^{\text{погл}} = m_{\text{МЕА}}^{\text{погл}} \cdot \frac{100}{C_{\text{МЕА}}}; \quad m_{\text{МЕА}_{p-n}}^{\text{погл}} = 42073,66 \cdot \frac{100}{18} = 233742,555 \text{ кг/ч.}$$

Определим количество поглощенной воды и образовавшейся соли:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{погл}} = 30348,214 \cdot \frac{2 \cdot 18}{2 \cdot 44} = 12415,178 \text{ кг/ч,}$$

$$m_{\text{соли}}^{\text{обр}} = 30348,214 \cdot \frac{2 \cdot 123}{2 \cdot 44} = 84837,052 \text{ кг/ч.}$$

Определим количество воды, перешедшей в раствор соли:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{p-\text{нсоли}} = (m_{\text{МЕА}_{p-n}}^{\text{погл}} - m_{\text{МЕА}}^{\text{погл}}) - m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{погл}},$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{p-\text{нсоли}} = (233742,555 - 42073,66) - 12415,178 = 179253,717 \text{ кг/ч,}$$

Проверим расчеты путем решения уравнения материального баланса:

$$m_{\text{CO}_2}^{\text{погл}} + m_{\text{МЕА}}^{\text{погл}} + m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{погл}} = m_{\text{соли}}^{\text{обр}},$$

$$30348,214 + 42073,66 + 12415,178 = 84837,052$$

приход 84837,052 = расход 84837,052

Таким образом, выполненный расчет очистки доменного газа от диоксида углерода моноэтаноламином для условий доменной печи полезным объемом 1033 м³ показал, что для снижения содержания СО₂ в восстановительном газе до 1 % требуется 233742,555 кг/ч раствора МЭА.

Литература:

1. Вегман, Е.Ф. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, А.Ф. Похвиснев. – М.: Академкнига, 2004. – 756с.
2. Zhao, J. Review of green and low-carbon ironmaking technology / J. Zhao, H. Zuo, Y. Wang et al. // Ironmaking & Steelmaking Processes. – 2020. – Vol. 47. – No. 3. – pp. 296-306.
3. Юдашкин, М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
4. Черепанов, К.А. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии / К.А. Черепанов, Г.И. Черныш, В.М. Динельт, Ю.И. Сухарев. – М.: Металлургия, 1994. – 224 с.
5. Кочура, В.В. Разработка способа производства горячего восстановительного газа и технологии доменной плавки с его использованием / В.В. Кочура, Р.В. Куртенков // Черные металлы. – 2024. – №9. – С.15-22.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТОЧНЫХ ВОД КОКСОХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ НА СОСТОЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Колодий Е.А., Трошина Е.А.

Донецкий национальный технический университет

В процессах подготовки и коксования угля, улавливания и переработки химических продуктов на коксохимических заводах образуются следующие отходы, количество которых составляет (в % от массы сухой угольной шихты):

- выбросы в атмосферу (пыль, углеводороды, оксиды углерода, серы и азота и т.п.) - 0,7-0,8;
- фенолсодержащие сточные воды - 30-40;
- отходы химических цехов (фусы, кислые смолки, кубовые остатки, полимеры) - 0,25-0,28.

Кроме того, на углеобогажительных фабриках образуются отходы углеобогащения в количестве до 35-50 % от массы готовой шихты.

Загрязненные сточные воды на большинстве коксохимических заводов страны составляют 0,35-0,4 м³/т сухой шихты, или 0,45-0,53 м³/т кокса. Самый большой объем загрязненных стоков принадлежит сточным водам, содержащих фенол. В общезаводском стоке коксохимических производств, кроме фенолов, содержатся аммиак, сероводород, цианиды, бензол, смолы, которые являются основными носителями канцерогенных веществ [1].

Средний состав сточных вод различных цехов коксохимических предприятий приведен в таблице 1.

Кроме фенольных, следует выделить и сточные воды, образующиеся при тушении кокса. Мокрое тушение производится водой, подаваемой через оросительное устройство, расположенное в башне тушения, куда выгруженный из печи раскаленный кокс подается в коксотушильном вагоне. Для тушения кокса расходуется около 1 м³ воды на 1 т кокса. Из этого количества 0,5 м³ теряется вследствие испарения и на увлажнение кокса, а 0,5 м³ представляют собой сточные воды, стекающие в резервуар-отстойник. Неиспарившаяся при контакте с раскаленным коксом вода загрязняется мелкими частичками кокса и выделяется в отдельную систему оборотного водоснабжения. Для удаления дисперсных частиц вода поступает в шламовый отстойник, а затем возвращается в цикл.

Как следует из приведенных в таблице 1 данных, использовать сточные воды, образующиеся на различных этапах коксохимического производства, или сбрасывать эти воды в водные объекты без очистки невозможно, причем обеспечить эффективную очистку может лишь применение нескольких методов.

Как правило, образующиеся в производственных процессах сточные воды практически полностью поступают на тушение кокса. Исключение составляют заводы, где применяют наряду с тушением водой сухое тушение кокса. В этом случае часть сточных вод, очищенных на заводских очистных сооружениях,

выводят за пределы предприятия и подвергают дополнительной очистке на внеплощадочных очистных сооружениях совместно с бытовыми сточными водами.

Таблица 1 – Состав сточных вод коксохимических производств

Содержание, мг/дм ³	Источник образования сточных вод					
	После аммиачной колонны	Из цикла конечного охлаждения	Сепараторная бензол- ного отделения	Цех ректификации	Разгонка смолы	Общий сток фенольный вод
Фенолы	0,3-1,3	0,1-2,0	0,2-0,4	0,2-0,3	2,0-5,0	0,2-0,4
Аммиак: летучий связанный	0,05-0,2 0,1-0,5	0,01-0,1 0,1-0,2	0,03-0,05 0,1-0,2	0,05-0,1 0,02	0,5 0,2	0,3 0,6
Сероводород	0,02-0,05	0,1	0,1	0,01	0,05	0,05
Роданид-ион	0,4-0,6	0,4-0,6	0,1	нет	0,05	
Цианид-ион	0,02	0,1	0,15	Следы	0,03	0,02- 0,04
БПК, мг О ₂ /дм ³	1600	2000- 3000	2000	1000	2500- 7000	1000- 3000

В любом случае для достижения эффективной очистки сточных вод требуется применение группы методов. Во-первых, это механические методы, например, отстаивание, позволяющие удалить смолы и масла, физико-химические, например, флотация, что позволяет обеспечить высокую степень очистки от смол и масел.

Для удаления растворенных веществ возможно применение различных методов: экстракционных, адсорбционных окислительных и др. Однако в условиях коксохимических предприятий наиболее целесообразно применение биохимических методов, суть которых заключается в способности микроорганизмов использовать в качестве питательных веществ органические и некоторые неорганические загрязнения сточных вод путем их

биохимического окисления. Микроорганизмы культивируются в активном иле. Несмотря на значительные капитальные затраты, применение биохимического способа позволяет осуществлять наиболее полную очистку сточных вод от растворенных органических и некоторых неорганических загрязнений – эффективность достигает 95-98 %.

В процессе очистки часть окисляемых микроорганизмами загрязнений затрачивается на образование биомассы, вторая часть превращается в безвредные продукты CO_2 , H_2O и др. Процесс очистки условно состоит из двух стадий: сорбции поверхностью микроорганизмов растворенных загрязнений и последующего биохимического окисления их внутри клеток.

Биохимический микробный способ очистки с применением выделенных в результате длительной направленной селекции культур фенол- и роданидразрушающих микробов обладает способностью осуществлять биохимические окисления высококонцентрированных загрязнений фенольных вод, содержащих, мг/дм³: фенолы - 400, роданиды - 400, цианиды -20, общие масла - 35, аммиак летучий - до 250 [2].

Оптимальными условиями для нормальной жизнедеятельности микробов являются: стабильный состав загрязнений фенольных вод, предварительная очистка от механических примесей смолы и масел, нейтральная или слабощелочная реакция с рН 7-8,5, оптимальная температура 25-35 °С, обогащение кислородом и наличие биогенных элементов - азота, фосфора, железа. Стабильность сточных вод по составу загрязнений, температуре, рН и другим свойствам является необходимым условием в связи с медленной адаптацией бактерий к изменениям окружающей среды. Резкие колебания загрязнений приводят к временным нарушениям нормальной жизнедеятельности микроорганизмов, ухудшению эффективности очистки. Содержание смолы и масел в сточной воде оказывают отрицательное влияние на жизнедеятельность микроорганизмов, вызывают пенообразование в аэротенках, что затрудняет их эксплуатацию [3].

Основными сооружениями биохимической очистки являются аэротенк, в котором происходит непосредственное биохимическое окисление загрязнений, и вторичный отстойник для отделения активного ила. Эффективность окисления загрязнений определяется жизнедеятельностью бактерий, и в случае каких-либо отклонений от оптимальных условий возможно снижение активности микроорганизмов, что в свою очередь может привести к уменьшению эффективности очистки.

При одновременной очистке сточных вод от фенолов и роданидов окисление последних при температуре 28-34 °С проходит примерно в 3 раза медленнее окисления фенолов и начинается тогда, когда концентрация фенолов снижается до 20-30 мг/дм³. Это также может привести к снижению степени очистки

В этом случае при подаче недостаточно очищенной воды на тушение кокса загрязняющие вещества при соприкосновении с раскаленным коксом испаряются и попадают в окружающую, атмосферу. Кроме того, часть вредных

веществ (сероводород, цианистый водород и сернистый ангидрид) дополнительно образуется при взаимодействии раскаленного кокса с водой. Поэтому даже при незначительном содержании в сточной воде вредных веществ их концентрация в парах из тушильной башни превышает предельно допустимые концентрации по существующим нормам.

Для обеспечения стабильной работы установки биохимической очистки одним из вариантов является проведения процесса в две стадии. В таких установках окисление фенолов происходит фенолразрушающими бактериями в аэротенке I ступени. Окисление роданидов осуществляется соответствующими бактериями в аэротенках II ступени. Это приводит к стабилизации работы очистных сооружений и, как следствие, увеличению степени очистки. В случае необходимости схема может быть дополнена третьей ступенью - установками нитрификации-денитрификации [4]. В результате применения двух- или трехступенчатых схем очистки сточных вод на тушение кокса поступает вода с минимальным содержанием загрязнений, что значительно снижает количество вредных веществ поступающих в атмосферу при тушении кокса.

Таким образом, для снижения негативного воздействия сточных вод коксохимических производств на состояние окружающей среды целесообразно применение двухступенчатых схем биохимической очистки, включающие раздельное биологическое окисление фенолов и роданидов.

Литература:

1. Сточные воды коксохимического производства: сайт — URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2018/RM18/pages/Articles/53513-.pdf>
2. Григорук Н. О., Водоснабжение, канализация и очистка сточных вод коксохимических предприятий / Н. О. Григорук., Г. П. Пушкарев, — Москва: Металлургия, 1987. — 120 с.
3. Гринберг А. М., Обесфеноливание сточных вод коксохимических заводов / А. М. Гринберг — Москва: Металлургия, 1986. — 212 с.
4. Сабирова, Т. М., Неволina, И. В. О возможности и перспективах биотехнологии для очистки сточных вод коксохимического производства // Кокс и химия. – 2016 – №3. – С. 77–83.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА УГОЛЬНОГО КОКСА

Абрамова А.А., Горбатко С.В.
Донецкий национальный технический университет

Производство угольного кокса является одним из ключевых процессов в металлургической промышленности, особенно в производстве чугуна и стали. Однако этот процесс сопровождается рядом экологических проблем, которые требуют внимательного изучения и решения.

Одним из основных экологических вопросов, связанных с производством угольного кокса, является загрязнение атмосферы. В процессе коксования угля выделяются различные вредные вещества, такие как оксиды серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), угарный газ (CO) и другие. Эти вещества могут оказывать негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду.

Для снижения выбросов вредных веществ в атмосферу применяются различные технологии и методы. Например, на коксохимических заводах могут устанавливаться фильтры и системы очистки газов, которые позволяют улавливать и нейтрализовать вредные вещества. Однако даже при использовании этих технологий полностью исключить выбросы вредных веществ невозможно.

Кроме того, производство угольного кокса сопровождается выделением большого количества пыли, которая также может загрязнять атмосферу. Пыль может содержать различные вредные вещества, включая тяжёлые металлы, которые могут накапливаться в почве и растениях, а затем попадать в пищевую цепочку [1, 2].

Ещё одной экологической проблемой, связанной с производством угольного кокса, является образование отходов. В процессе коксования угля образуются различные отходы, такие как коксовая мелочь, шлам и другие. Эти отходы могут содержать вредные вещества и требуют правильной утилизации.

Неправильная утилизация отходов может привести к загрязнению почвы и воды. Например, коксовая мелочь может содержать тяжёлые металлы и другие вредные вещества, которые могут накапливаться в почве и попадать в растения. Шлам также может содержать вредные вещества, которые могут попадать в грунтовые воды.

Для решения этой проблемы необходимо разработать и внедрить эффективные технологии утилизации отходов производства угольного кокса. Например, коксовую мелочь можно использовать в качестве компонента для производства строительных материалов, а шлам — для производства цемента.

Производство угольного кокса также может оказывать негативное влияние на водные ресурсы. В процессе производства могут образовываться сточные воды, которые могут содержать вредные вещества. Эти сточные воды могут попадать в реки, озёра и другие водоёмы, что может привести к загрязнению воды и гибели водных организмов.

Для предотвращения загрязнения водных ресурсов необходимо внедрять системы очистки сточных вод на коксохимических заводах. Эти системы должны обеспечивать удаление вредных веществ из сточных вод перед их сбросом в водоёмы.

Производство угольного кокса также может приводить к изменению ландшафта. Например, при добыче угля открытым способом могут образовываться карьеры и отвалы, которые могут изменять естественный ландшафт и приводить к потере природных территорий [3, 4].

Для минимизации этого воздействия необходимо проводить рекультивацию земель после завершения добычи угля. Рекультивация включает в себя восстановление плодородного слоя почвы, посадку растений и создание условий для восстановления естественного ландшафта.

Производство угольного кокса также связано с высокими энергозатратами и выбросами парниковых газов. Это вносит вклад в изменение климата и глобальное потепление.

Снижение энергопотребления и выбросов парниковых газов может быть достигнуто путём оптимизации процессов коксования, использования более эффективных технологий и перехода на альтернативные источники энергии.

Производство угольного кокса является важным процессом в металлургической промышленности, но оно также сопровождается рядом экологических проблем. Для их решения необходимо внедрять новые технологии, оптимизировать процессы производства и разрабатывать эффективные методы утилизации отходов. Только так можно минимизировать негативное воздействие производства угольного кокса на окружающую среду.

Литература:

1. Ветошкин А. Г. «Теоретические основы защиты окружающей среды». Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 2008. — 290 с.
2. Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. «Экологический вызов и устойчивое развитие». Учебное пособие. — М.: Прогресс-Традиция, 2000. — 413 с.
3. Новиков В. Э. «Экологическая экспертиза и оценка воздействия на окружающую среду». — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. — 192 с.
4. Хабарова Е. В. «Основы рационального природопользования». Учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 319 с.

РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Гатина А.А., Садыкова Р.Р.

Альметьевский государственный технологический университет
(Высшая школа нефти)

Современная металлургическая промышленность играет ключевую роль в обеспечении социально-экономического развития государств, являясь одним из наиболее энергоемких и ресурсоемких секторов экономики. В условиях глобализации, повышения экологической ответственности и ужесточения нормативных требований к промышленной деятельности становится насущной необходимостью внедрения систем экологического менеджмента (ЭМ) для минимизации негативного воздействия производственных процессов на окружающую среду. В то же время интеграция экологических практик в стратегии корпоративного управления помогает повысить их операционную эффективность, снизить затраты и укрепить свои конкурентные позиции на рынке.

Несмотря на растущий интерес к вопросам экологической ответственности в металлургическом секторе, наблюдается недостаточная систематизация научных данных о механизмах влияния электромагнитных систем на показатели деятельности предприятий данной отрасли. В частности, недостаточно изучены взаимосвязи между внедрением экологических стандартов и экономическими результатами, а также факторы, обеспечивающие успешную реализацию экологических инициатив в контексте конкретного металлургического производства.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения экологической ответственности сталелитейных заводов в рамках их устойчивого развития. В связи с этим важно определить механизмы повышения операционной эффективности за счет внедрения систем экологического менеджмента и разработать научно обоснованные рекомендации по оптимизации этих процессов.

Целью данной работы является всесторонний анализ роли экологического менеджмента в повышении эффективности металлургического предприятия с учетом современных тенденций и требований международных стандартов. Для достижения этой цели необходимо оценить влияние электромагнитных систем на ключевые показатели эффективности предприятий, определить факторы успешной интеграции экологических практик и разработать рекомендации по оптимизации с учетом отраслевых особенностей.

В условиях современного промышленного развития особое значение имеет обеспечение экологической безопасности и устойчивого развития металлургических предприятий. Рост производства, технологические особенности отрасли и интенсивное использование природных ресурсов

приводят к значительному воздействию на окружающую среду, что диктует необходимость поиска эффективных механизмов его минимизации.

Однако, несмотря на очевидные преимущества экологического менеджмента, существует недостаточное научное понимание его влияния на результаты деятельности металлургических компаний. В большинстве случаев внедрение систем экологического менеджмента рассматривается как отдельная функция, которая не интегрирована в общую стратегию управления, что снижает ее потенциальную эффективность [1]. Кроме того, не существует единого метода оценки воздействия природоохранных мероприятий на экономические показатели и операционную деятельность предприятий.

Поэтому актуальной проблемой является недостаточная систематизация знаний о механизмах и факторах успешного внедрения экологического менеджмента в сталелитейной промышленности и их влиянии на повышение эффективности производственной деятельности. Решение этой проблемы требует всестороннего анализа существующих подходов к внедрению систем ЭМ, выявления ключевых факторов их эффективности и разработки рекомендаций по интеграции экологических практик в стратегию развития сталелитейных заводов.

Несмотря на значительное количество научных исследований, посвященных роли экологического менеджмента (ЭМ) в повышении эффективности металлургических заводов, в современной научной литературе существует ряд нерешенных и актуальных вопросов, которые требуют дальнейшего теоретического и практического изучения. В частности, выделяются следующие области научных исследований:

1. Недостаточная систематизация механизмов влияния систем экологического менеджмента на экономические показатели предприятий. В большинстве существующих исследований отсутствует всесторонний анализ взаимосвязи между внедрением экологических практик и ключевыми показателями эффективности (такими как прибыльность, производительность и эксплуатационные расходы), что затрудняет построение универсальных моделей для оценки эффективности внедрения ЭМ.

2. Недостаточный учет отраслевых и технологических особенностей металлургической промышленности. Уникальные технологические процессы и экологические проблемы металлургического сектора требуют разработки специализированных методических подходов к внедрению ЭМ-систем, что в настоящее время является недостаточно разработанным аспектом.

3. Ограниченные исследования долгосрочных последствий внедрения систем экологического менеджмента. Большая часть существующей работы сосредоточена на краткосрочных результатах или нормативных требованиях, в то время как влияние ЭМ на стратегическую устойчивость, инновационное развитие и конкурентоспособность компаний требует более глубокой аналитической отчетности.

4. Недостаточное знание мотивационных факторов и препятствий для внедрения ЭМ-систем. Внутренние (организационные, управленческие) и

внешние (нормативные, рыночные) факторы, влияющие на принятие решений руководством металлургической компании в отношении интеграции экологических систем, изучены не в полной мере.

5. Недостаточная разработка методов количественной оценки вклада экологической деятельности в общую эффективность деятельности предприятия с учетом отраслевых особенностей. Не существует единой методологической основы для оценки эффективности интеграции ЭМ-систем в процессы управления металлургическими предприятиями.

Поэтому актуальной задачей современной науки является проведение междисциплинарных исследований, направленных на разработку универсальных моделей и методов оценки воздействия природопользования на результаты деятельности металлургических предприятий с учетом их технологических и стратегических особенностей, а также долгосрочных целей устойчивого развития [2].

Целью данной исследовательской работы является всесторонний анализ роли экологического менеджмента (ЭМ) в повышении операционной и стратегической эффективности металлургических компаний. В рамках достижения этой цели были сформулированы следующие конкретные цели:

1. Проанализировать теоретические основы и современные концептуальные подходы к внедрению систем экологического менеджмента в сталелитейной промышленности.

2. Определить основные показатели деятельности металлургических предприятий, на которые влияет внедрение систем экологического менеджмента, и разработать критерии их оценки.

3. Изучить существующие модели и практики интеграции экологического менеджмента в процессы управления металлургическими предприятиями, чтобы определить наиболее эффективные методы внедрения.

4. Определите внутренние и внешние факторы, которые способствуют успешному внедрению ЭМ-систем, а также барьеры, препятствующие их внедрению и функционированию.

5. Разработать рекомендации по оптимизации процессов внедрения систем экологического менеджмента в целях повышения общей эффективности работы металлургических предприятий.

6. Оценить долгосрочные экономические, экологические и социально устойчивые последствия внедрения ЭМ-систем в современной сталелитейной промышленности с учетом отраслевых специфических и стратегических целей развития.

На основе проведенного анализа и выявленных факторов, влияющих на успешность внедрения систем экологического менеджмента на сталелитейных заводах, предлагаются следующие научно обоснованные рекомендации:

1. Стратегическая поддержка высшего звена

Обязательное участие руководства в реализации экологических инициатив должно быть сформировано и закреплено в политике компании, что

способствует формированию корпоративной культуры, основанной на принципах устойчивого развития и экологической ответственности.

2. Интеграция ЭМ-системы в процессы стратегического управления

Рекомендуется внедрять ЭМ-системы как неотъемлемую часть системы корпоративного управления и стратегического планирования, которая обеспечивает системный подход к управлению экологическими аспектами деятельности компании и повышает их эффективность.

3. Разработка программ обучения и повышения квалификации персонала

Для сотрудников всех уровней следует регулярно организовывать образовательные мероприятия, направленные на повышение их компетентности в области управления окружающей средой, стандартов и передовой практики, что может способствовать повышению внутреннего опыта и вовлеченности сотрудников [3].

4. Внедрение современных информационных технологий для мониторинга и оценки экологических показателей

Рекомендуется использовать автоматизированные системы сбора, анализа и представления экологических данных для обеспечения быстрого контроля экологической ситуации, своевременного выявления отклонений и принятия обоснованных управленческих решений.

5. Создание системы мотивации и стимулирования сотрудников к прогрессу в области охраны окружающей среды

Необходимо разработать механизмы материального и нематериального поощрения персонала к достижению экологических целей, чтобы повысить ответственность и инициативу в реализации экологических программ.

6. Постоянное совершенствование системы посредством обратной связи и оценки эффективности

Рекомендуется регулярно проводить внутренние аудиты, анализировать показатели эффективности системы ЭМ и осуществлять корректирующие действия для повышения ее эффективности и способности адаптироваться к меняющимся условиям.

7. Развивать партнерские отношения с заинтересованными сторонами

Необходимо наладить активное сотрудничество с государственными органами, научными учреждениями, общественными организациями и местным сообществом для обмена опытом, получения экспертной поддержки и повышения репутации компании.

8. Предоставление финансовых ресурсов для осуществления природоохранных мероприятий

Необходимы достаточные инвестиции для внедрения инновационных технологий, модернизации производственных мощностей и развития экологической инфраструктуры.

Выполнение этих рекомендаций повысит эффективность внедрения ЭМ-систем на металлургических заводах за счет снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения экономической эффективности

деятельности и укрепления конкурентных позиций организации на современном рынке.

Исследование показало, что внедрение систем экологического менеджмента (ЭМ) играет ключевую роль в повышении общей эффективности металлургических компаний. Анализ теоретических основ и практических аспектов показал, что систематизация окружающей среды не только снижает негативное воздействие на окружающую среду, но и дает значительные экономические выгоды за счет оптимизации использования ресурсов, снижения затрат и повышения производительности труда.

Особое значение имеет интеграция ЭМ-систем в процессы стратегического управления компанией, что способствует формированию устойчивых конкурентных преимуществ и повышению репутации компании. Внедрение современных информационных технологий и развитие корпоративной культуры экологической ответственности являются важными факторами успешной реализации экологических инициатив.

Результаты исследования подтверждают необходимость системного подхода к внедрению экологических систем, а также постоянного совершенствования их элементов на основе обратной связи и оценки эффективности. Важным аспектом является активное участие руководства и мотивация персонала, что обеспечивает долгосрочную устойчивость экологических программ.

Таким образом, роль экологического менеджмента в повышении эффективности металлургического предприятия многогранна и многослойна. Его внедрение способствует не только соблюдению экологического законодательства, но и достижению стратегических целей компании, таких как повышение эффективности производства, снижение затрат и укрепление позиций на рынке. В контексте современных глобальных вызовов разработка систем ЭМ становится предпосылкой долгосрочной устойчивости сталелитейных заводов и их конкурентоспособности в условиях перехода к более экологически чистой экономике.

Литература:

1. Ласкина Л.Ю. и др. Прозрачность отчетности как мера управления рисками / Ласкина Л.Ю., Сивякова М.В // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2012. №2.
2. Белозерский А.Ю. Методическое обеспечение анализа и управления рисками металлургических предприятий в условиях неопределенности: Автореф. ... дис. д-ра экон. наук. - Москва, 2012. - 40 с.
3. Оленин Д.С. Управление рисками вертикально-интегрированных металлургических компаний: Автореф. дис. к-та экон. наук. - СПб, 2008. - 20 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

Бурин А.Н., Герцык С.И. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОДУВКИ РАСПЛАВА В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ.....	6
Карпук А.В., Левченко Э.П., Левченко О.А. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ГИДРАВЛИЗАЦИИ ПРИВОДА ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ	11
Безмилицин С.С., Кузин А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АГЛОМЕРАТА РАЗЛИЧНОЙ ОСНОВНОСТИ.....	16
Кучеренко Л.Э., Левченко Э.П., Левченко О.А. НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	21
Хаджинов Е.А., Кочура В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ.....	25
Куливар Д.Р., Заика В.И. РЕГУЛИРОВАНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ ШЛАКА ЭШП, КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛЕ.....	28
Огарок П.О., Заика В.И. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 4Х5МФС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭШП	34
Назарюк В. Ю., Симоненко В.И. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛА ОТЛИВОК КОЛЕС ШЛАМОВЫХ НАСОСОВ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС	38
Шедловский Д.В., Асламова Я.Ю. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНЫ В ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	40

2. ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И СВАРКА

Белова Д.А., Матвеев И.А., Десницкая Л.В. ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В ЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ.....	45
Бородацкий И.А., Дятлов Д.В., Пасечник С.Ю. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	48
Бородацкий И.А., Дятлов Д.В., Пасечник А.Ю. ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ БРОНЗ ТИПА БрАЖ	52

Дятлов Д.В., Бородацкий И.А., Пасечник А.Ю. ОТЛИВКА КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК В КОКИЛЬ	55
Максимов Р.А., Матвеев И.А. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НА КАЧЕСТВО НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ	58
Симонов А.Ю., Пасечник С.Ю., Ошовский В.В. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФИЛАМЕНТА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И УГЛЕРОДНЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ	62
Слободин В.А., Пахомов Р.А., Бажин В.Ю. ИЗВЛЕЧЕНИЕ МПГ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ АВТОКАТАЛИЗАТОРОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ И ТЕНДЕНЦИЙ ИХ РАЗВИТИЯ	67

3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Гавриченко А.В., Закарлюка С.В., Шевелев А.И. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕССИММЕТРИЧНОЙ КОРОБОВАТОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС	73
Глазунов А.В., Закарлюка С.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ РАСКАТОВ ПРИ ПОЭТАПНОЙ РАЗДАЧЕ ШИРИНЫ	77
Гордиенко В.М., Закарлюка С.В. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС К ПОТЕРЕ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ	81
Токарь А.А., Яковченко А.В. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА ДИАМЕТРОМ 957 ММ С 2-РАДИУСНЫМ ДИСКОМ	85
Серегин М.С., Скляр В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОРРОЗИЙНО-СТОЙКИХ БИМЕТАЛЛОВ	89
Чумак Н.Ю., Яковченко А.В. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОКАТКИ	94

4. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ

Боднарюк С., Штыхно А.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ	98
Голубев Д.И., Егоров Н.Т. ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ 10Г2С1 .	102
Гуляев А.В., Крымов В.Н. ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВА КОЛОСНИКА	

ЩЕЛЕВЫХ СИТ	105
Каркошко В.С., Горбатенко В.П. ОЦЕНКА СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ ДОЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ	108
Коновалов Н.А., Крымов В.Н., Симоненко В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЧУГУНОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИЛ ТАРЕЛЬЧАТОЙ ДРОБИЛКИ	112
Логвиненко А.А., Штыхно А.П. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ, УПРОЧНЕННЫХ С ДЕФОРМАЦИОННОГО НАГРЕВА..	115
Логвиненко А.Н., Штыхно А.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 5ХНМ.....	118
Меликова Т.Н., Штыхно А.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ	121
Перевалов С.И., Петрущак С.В. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ	125
Савула Е.А., Крымов В.Н., Горбатенко В.П. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ДИФфуЗИОННЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ....	128
Штыхно Т.А., Матвиенко В.Н. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА КАЧЕСТВО СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	132

5. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Галив Н.В., Гридин С. В. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И РАБОЧЕГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС.....	136
Новичков Р.С., Гридин С. В. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВАРИЙНО - УСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА	140
Толстошеев С.В., Гридин С. В. АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ	144
Калмыков И.Л., Гридин С. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ	148
Гулов К.К., Гридин С. В. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКА 200 МВт И СНИЖЕНИЮ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ	152
Крапивин А.С., Гридин С. В. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО	

СНИЖЕНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ	156
Каминский К.Д., Лебедев А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ СИСТЕМЫ ЖКХ	160
Гребенюк А.А., Сафонова Е.К. ИННОВАЦИИ В КОНСТРУКЦИИ КОТЛА ТВГ-8М: МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСТАНДАРТНЫХ ФОРМ ТРУБ	164
Гребенюк А.А., Сафонова Е.К. АНАЛИЗ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЛУЧШЕНИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА В КОТЛАХ ТВГ-8М: НОВЫЕ ФОРМЫ ТРУБ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ .	168

6. ЭКОЛОГИЯ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ОХРАНА ТРУДА В МЕТАЛЛУРГИИ

Пастухов И.Б., Асламова Я.Ю., Парфенюк С.А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЗОВОВ.....	173
Левченко М.Э., Павленко А.Т., Левченко Э.П. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ ГОРНЫХ ОТВАЛОВ И МУСОРНЫХ ПОЛИГОНОВ.....	178
Левченко М.Э., Павленко А.Т., Левченко О.А. ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА	181
Платова О.К., Ошовский В.В. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕРЫ В УГЛЕ.....	185
Гапонов С.И., Ошовский В.В. ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	190
Сахаров А.С., Крымов В.Н. ОХРАНА ТРУДА ТЕРМИСТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА УСТАНОВКАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ...	194
Бочинский Р.Ю., Ошовский В.В. 3D-ПЕЧАТЬ КОМПОЗИТАМИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ ТРАДИЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРБОНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	198
Довгаль А.А., Кочура В.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА.....	201
Печень Е.В., Кочура В.В. ОЧИСТКА ДОМЕННОГО ГАЗА ОТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА РАСТВОРОМ МОНОЭТАНОЛАМИНА	205
Колодий Е.А., Трошина Е.А. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТОЧНЫХ ВОД	

КОКСОХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ НА СОСТОЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	209
Абрамова А.А., Горбатко С.В. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА УГОЛЬНОГО КОКСА.....	213
Гатина А.А., Садыкова Р.Р. РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	215

Научное издание

**II ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**

**«МЕТАЛЛУРГИЯ XXI СТОЛЕТИЯ
ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ»**

Сборник материалов
II Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых и студентов
28 мая 2025 г.

Ответственный редактор – Асламова Яна Юрьевна