

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

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ XXI СТОЛЕТИЯ ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ

Сборник материалов
Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых и обучающихся
26-27 мая 2026 г.



**Донецк
2026**

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

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ XXI СТОЛЕТИЯ ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ

Сборник материалов
Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых и обучающихся
26-27 мая 2026 г.

Донецк
2026

УДК 62(063)
ББК 30
И62

Рекомендовано к изданию
Советом факультета металлургии и теплоэнергетики
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
(протокол № 4 от 22.05.2026 г.)

Ответственный редактор – Кочура Владимир Васильевич

Редакционная коллегия:

Гнитиёв П. А. (председатель); Асламова Я. Ю.; Бирюков А. Б.; Закарлюка С. В.;
Пасечник С. Ю.; Корзун Е. Л.; Кочура В. В.; Крымов В. Н.; Салмаш И. Н.

В62 **Инженерные технологии XXI столетия глазами молодых : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и обучающихся, г. Донецк, 26-27 мая 2026 г. / Ред. кол.: Гнитиёв П. А. (пред.); Асламова Я. Ю.; Бирюков А. Б. [и др.]; отв. ред. В. В. Кочура. – Донецк : ДонНТУ, 2026. – 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 в черной и цветной металлургии, обработки металлов давлением, материаловедения, металловедения и термической обработки металлов. Рассмотрены вопросы энергосберегающих технологий, теплоэнергетики, химической технологии и прикладной экологии.

Издание может быть полезно аспирантам, обучающимся, научным и инженерно-техническим работникам, а также всем интересующимся данной тематикой.

Тексты докладов печатаются в авторской редакции.

УДК 62(063)
ББК 30

© ФГБОУ ВО «ДонНТУ», 2026

Уважаемые студенты и молодые учёные!



Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и обучающихся «Инженерные технологии XXI столетия глазами молодых» посвящена 105-й годовщине образования Донецкого национального технического университета.

В 2026 году в конференции принимают участие молодые ученые и студенты из 13 ведущих вузов страны.

В этом сборнике представлены результаты актуальных научных исследований и технических разработок по ключевым направлениям инженерных технологий: современные металлургические и литейные технологии в черной

и цветной металлургии, сварка, обработка металлов давлением, материаловедение и технологии материалов, промышленная теплотехника, теплоэнергетика, химическая технология топлива и прикладная экология.

Доклады систематизированы по следующим секциям:

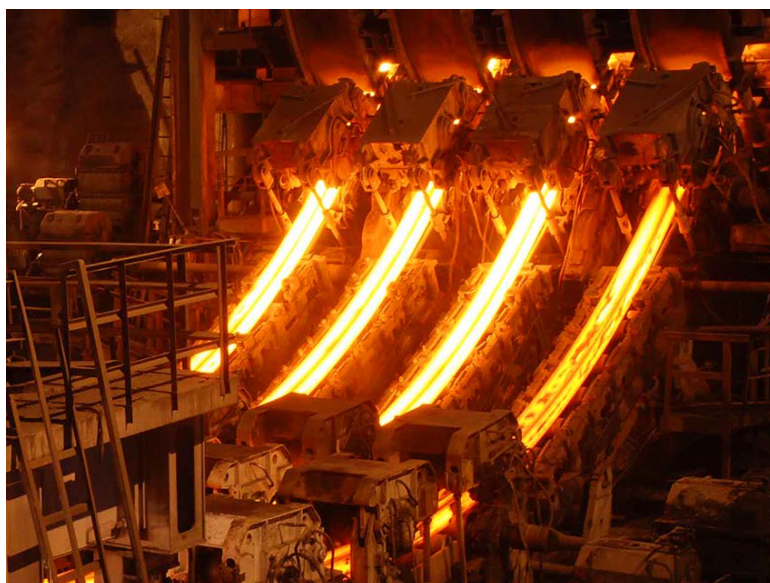
- *Металлургия черных металлов*
- *Цветная металлургия, литейное производство и сварка*
- *Обработка металлов давлением*
- *Материаловедение и технологии материалов*
- *Промышленная теплотехника*
- *Теплоэнергетика*
- *Химическая технология и прикладная экология*

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

Надеюсь, что предложенные молодыми исследователями научно-технические решения, приведенные в этом сборнике, будут реализованы и помогут решению стоящих перед отечественной металлургией проблем.

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

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЁРНЫХ МЕТАЛЛОВ



ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КОВАННЫХ ПРУТКОВ ИЗ СПЛАВА ВЖ718 МЕТОДОМ ТРИПЛЕКС-ПРОЦЕССА

Лазаренко Н.К., Корзун Е.Л.

Донецкий национальный технический университет

Разработка и промышленное производство жаропрочных сплавов на никелевой основе берет свое начало в 1930-х – 1940-х годах с интенсивным развитием авиации и космической техники. Несмотря на молодую историю, по отношению к истории производства чугуна и стали которая берет начало в VI-V в. до н.э., область изучения жаропрочных сплавов на никелевой, железоникелевой и кобальтовой основах продвинулась далеко вперед, непрерывно улучшая имеющиеся составы и открывая новые опытные марки. В России одним из первых разработчиков и производителей суперсплавов были ВИАМ (Всероссийский институт авиационных материалов), ЦНИИТМАШ (Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения) и завод «Электросталь» [1]. В ДонНТУ изучение жаропрочных сплавов ведут на кафедре «Металлургические технологии и материаловедение», где имеется электрошлаковая печь для проведения переплава расходующихся электродов.

В данной работе будет приведен обзор реальной промышленной технологии производства слитка из железоникелевого сплава ВЖ718.

Целью данной работы является разработка эффективных методов улучшения качества кованых прутков из сплава ВЖ718 в промышленных условиях АО «СМК» (Ступинская металлургическая компания). Для достижения указанной цели был изучен опыт предыдущих инженеров при производстве подобных марок сплавов, а также проработаны на практике технологические приемы при переплавных процессах ЭШП и ВДП.

Характеристика сплава ВЖ718. Сплав ВЖ718 производят на АО «СМК» методом триплекс-процесса: выплавка электродов проходит на вакуумной индукционной печи, далее электроды переплавляют в электрошлаковой печи под слоем флюса и на заключительном этапе полученный слиток переплавляют в вакуумной дуговой печи. Слиток подвергают пластической деформации, таким образом, конечным продуктом является кованый пруток определенного диаметра. Указанная схема производства закреплена в нормативной документации [2] и позволяет получать слиток с направленной структурой и минимальным содержанием неметаллических включений, серы и газов. Сплав применяется в самолетостроении в ответственных частях двигателя ПД-8, разрабатываемого для гражданского самолета SJ-100.

Наиболее близким аналогом сплава является зарубежный сплав марки Inconel 718, химический состав которого представлен в табл. 1.

Обзор методов улучшения технологии электрошлакового переплава. При переплаве в электрошлаковой печи расходующего электрода с внутренними пустотами неизбежно наблюдаются отклонения массового расхода, колебания

тока и напряжения. Это может приводить к наличию несплошностей в самом слитке ЭШП (рис. 1).

Таблица 1 – Химический состав сплава Inconel 718 по ITN07763/07

Элемент	C	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Fe	S	P
Содержание, %	0,012-0,036	17,0-19,0	2,8-3,15	0,35-0,65	0,75-1,15	5,20-5,55	16,0-19,0	≤0,0010	≤0,015

Основным направлением для улучшения качества слитка ЭШП является обеспечение максимально плотного расходуемого электрода, без вторичных усадочных полостей и пор. Это позволит получать стабильную массовую скорость переплава и избежать несплошностей в готовом слитке ЭШП. Ввиду сложности в воздействии на процесс разливки сплава с вакуумной индукционной печи, предлагается проводить ковку расходуемых электродов ВИП перед вовлечением их на ЭШП. Такие работы уже были проделаны и имели положительный результат [3]. Негативным последствием ковки расходуемого электрода может явиться получение открытых трещин на поковке при отклонениях в технологии деформации или нагрева перед ковкой. В случае получения трещин вовлечение расходуемых электродов на ЭШП не допускается.



Рисунок 1 – Продольный темплет слитка ЭШП

В будущем перспективным направлением для снижения среднего размера неметаллических включений, снижения показателей дендритной ликвации и общего улучшения качества слитка ЭШП выглядит использование переменного тока пониженной частоты [4]. Опытные работы по применению данной технологии при частоте тока 2 Гц взамен тока частотой 50 Гц на стали

10Х9МФБ-Ш позволили снизить размер неметаллических включений с 7 мкм до 4 мкм [4].

Обзор методов улучшения технологии вакуумного дугового переплава. В технической литературе широко не распространены данные по влиянию двойного вакуумного дугового переплава (далее, двойной ВДП) на качество слитков. Имеются данные по двойному ВДП для стали СП28, где показано снижение концентрации газов, серы и цветных металлов в слитке, и повышение пластичности [5]. Проведение двойного вакуумного дугового переплава (использование схема ВИП + ЭШП + ВДП + ковка + ВДП) может существенно отразиться на себестоимости сплава, однако, в перспективе способно повысить качество и избежать брака продукции. Поэтому перспективным направлением является проведение работ по двойному ВДП сплава ВЖ718 с исследованием влияния его на качество прутков.

Полученные результаты и их обсуждение. Таким образом, основными направлениями в улучшении качества получаемых прутков из сплава ВЖ718 являются:

- 1) Проведение ковки расходуемого электрода ВИП перед вовлечением его в ЭШП. Это позволит существенно стабилизировать процесс переплава, получить минимум отклонений массового расхода при переплаве;
- 2) Использование переменного тока пониженной частоты при ЭШП, позволит провести дополнительное рафинирование металла от неметаллических включений и снизить показатели дендритной ликвации;
- 3) Проведение двойного ВДП по схеме: ВИП + ЭШП + ВДП + ковка + ВДП. Данная схема является альтернативой п.1 и направлена на дополнительное рафинирование и уплотнение слитка ВДП.

Литература:

1. Ломберг Б.С. Жаропрочные сплавы стали / Ломберг Б.С., Мубоян С.А., Калицев В.А. и др. [Электронный ресурс] // https://viam.ru/sites/default/files/upload/booklet/pdf/zhar_2012
2. ТУ 1-801-5484-2020 «Кованые прутки из сплава ВЖ718. Технические условия». 2020г.
3. Карягин Д.А. Пути улучшения качества кованых прутков из слитков сплава ВЖ718, изготовленных по схеме триплекс-процесса / Д.А. Карягин, С.В. Малютин, М.О. Смирнов и др. // Технология легких сплавов – 2024, №4 – С. 55-65.
4. Левков Л.Я. Новые возможности электрошлакового переплава при производстве современных чистых сталей / Л.Я. Левков, Д.А. Шурыгин, М.А. Киссельман и др. // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков, Москва – Тула, 15-19 октября 2018 – С. 116 – 123.
5. Дробот А.В. Влияние рафинирующих переплавок на газонасыщенность, загрязненность вредными примесями и технологические свойства стали СП28 открытой дуговой выплавки / Дробот А.В. [Электронный ресурс] https://www.rusnauka.com/36_PWMN_2010/Tecnic/76123.doc.htm (дата обращения: 28.02.2026).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАГРЕВА ШИХТЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Парталюк С. В., Шевцова Л.А., Тимофеева А.С.

Старооскольский технологический институт имени. А.А. Угарова (филиал)
НИТУ «МИСИС»

Производство железорудных окатышей представляет собой важнейший технологический передел в металлургии, определяющий качество исходного сырья для доменного процесса. Механические характеристики сырых окатышей во многом определяют их сохранность при транспортировке, загрузке и термической обработке. Одним из способов целенаправленного воздействия на эти характеристики является регулирование температуры нагрева шихтовых материалов перед окомкованием.

Прочность сырых окатышей формируется под действием капиллярных сил и адгезионного взаимодействия частиц концентрата с бентонитовой суспензией [1]. При нагреве бентонит активизируется: предельное напряжение сдвига суспензии резко возрастает, что обусловлено интенсификацией коагуляционного структурообразования и влиянием нагрева на поверхностное диспергирование [2]. Это обеспечивает более равномерное обволакивание рудных зёрен коллоидной плёнкой, что в сочетании с капиллярными менисками в контактных зонах формирует устойчивый силовой каркас окатыша.

Для проведения экспериментов в лабораторных условиях были изготовлены окатыши из магнетитового концентрата, нагретого до температур: 25°C (комнатная температура, без подогрева), 50°C и 80°C.

Шихту готовили из 2 кг магнетитового концентрата с добавлением бентонита и пыли по 0,8 % от массы концентрата. После взвешивания компоненты перемешивали 10–15 минут и просеивали через сито 1 мм.

При подготовке подогретой шихты концентрат помещали в десикатор, предварительно нагретый на 5°C выше целевой температуры (до 55°C при нагреве до 50°C и до 85°C при нагреве до 80°C), и выдерживали до достижения заданного температурного режима под контролем термопар. После нагрева определяли влажность концентрата, при необходимости доводили её до 9–10 % водой, подогретой на 5°C выше температуры концентрата, вводили бентонит, перемешивали и выдерживали 20 минут. Перед подачей в окомкователь влажность шихты составляла 8–9 %.

Окатыши с различной температурой концентрата получали на барабанном окомкователе (рис. 1).

Фракционный состав окатышей – 10 мм и 12 мм. Все образцы перед испытаниями проверялись на отсутствие внешних дефектов: поверхность должна быть гладкой, без трещин [3].



1 – станина; 2 – ходовые колёсики; 3 – барабан для окомкования шихты;
4 – пусковая кнопка; 5 – приёмный поддон; 6 – рычажное колесо регулировки
угла наклона барабана; 7 – осветительная лампа

Рисунок 1 – Барабанный окомкователь

Испытания на статическое сжатие проводились на специализированной установке (рис. 2), включающей электронные весы, давящий элемент, механизм его перемещения и фиксатор для образца. Окатыш устанавливался на чашку весов, после чего прозрачная пластина медленно опускалась посредством регулировочного винта до момента появления первых трещин, в который считывалась нагрузка разрушения.

Прочность сырых окатышей на сжатие при различном подогреве шихты указана в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний сырых окатышей на сжатие при различных температурах подогрева шихты

№ окатыш	Прочность окатышей, кг/ок					
	25°C		50°C		80°C	
а	12 мм	10 мм	12 мм	10 мм	12 мм	10 мм
1	0,83	0,46	1,34	1,035	1,14	1,25
2	0,97	0,62	1,15	0,98	1,35	1,31
3	0,73	0,65	1,29	1,01	1,405	1,32
4	0,725	0,81	1,42	0,83	1,355	1,045
5	0,62	0,72	1,2	1,15	1,47	0,98
Среднее	0,7135		1,14		1,2625	



1 – весы электронные; 2 – нагружающий элемент; 3 – привод вертикального перемещения нагружающего элемента; 4 – образец, подвергаемый испытанию

Рисунок 2 – Установка для лабораторного определения прочности окатышей при сжатии

Полученные данные свидетельствуют о закономерном росте прочности окатышей на сжатие с повышением температуры шихты. Нагрев до 50°C обеспечивает прирост прочности на 59,8%, а дальнейшее повышение до 80°C добавляет ещё около 10,7%. Столь заметный скачок при умеренном нагреве объясняется активацией бентонита и усилением капиллярных сил при частичном удалении свободной влаги.

Испытание на ударную прочность выполнялось методом многократного свободного падения окатыша с высоты 50 см на резиновый коврик до появления видимых повреждений или полного разрушения образца [4]. Число выдержанных сбросов являлось количественной мерой ударной прочности.

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Ударная стойкость сырых окатышей при различных температурах нагрева шихты, число сбросов

№ окатыша	Число сбросов, раз					
	25°C		50°C		80°C	
	12 мм	10 мм	12 мм	10 мм	12 мм	10 мм
1	10	6	20	26	10	14
2	5	10	21	19	28	9
3	8	10	33	19	16	12
Среднее	8,2		23		14,8	

Ударная стойкость демонстрирует ещё более выраженную зависимость от температурного режима. Наибольшее число сбросов зафиксировано при нагреве до 50°C: при данной температуре часть свободной влаги уже испарилась, силы сцепления между частицами достигли наибольшей величины, а структура окатыша ещё не утратила влагу сверх необходимого (рис. 3).

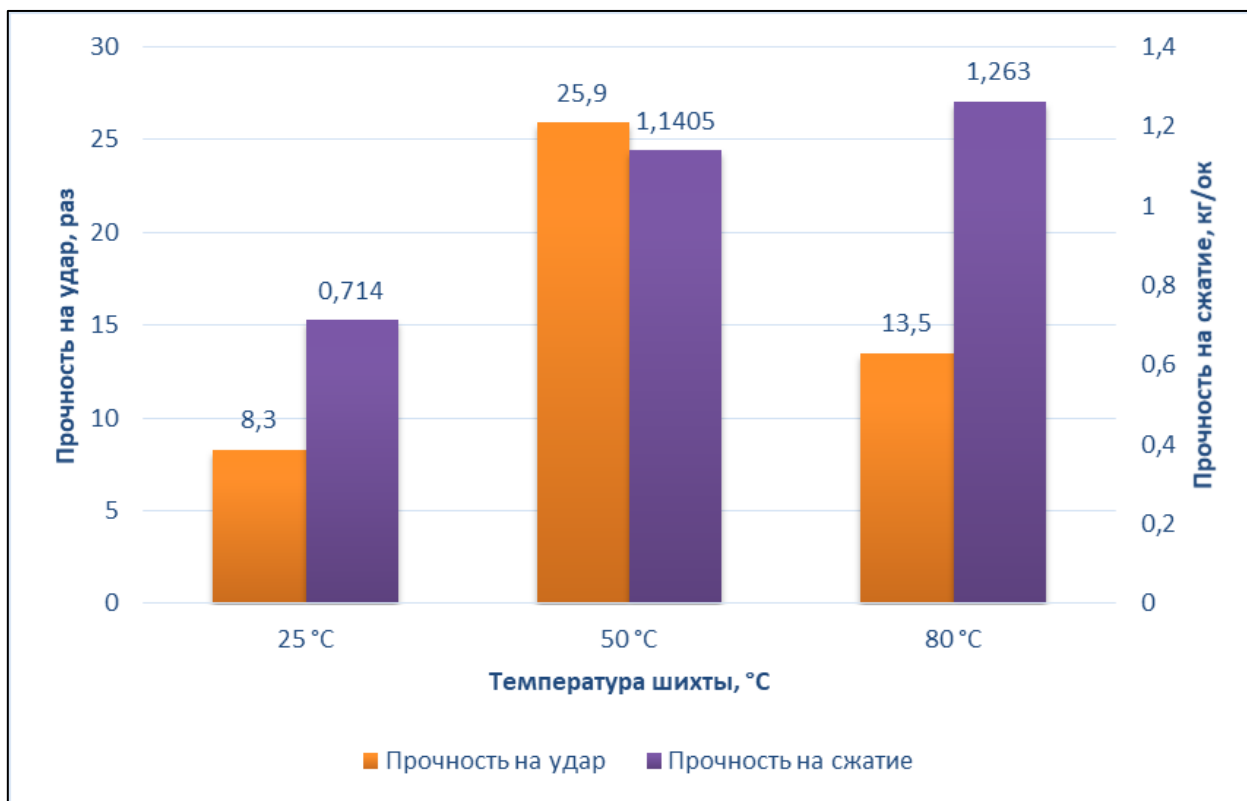


Рисунок 3 – Зависимость механических характеристик сырых окатышей от температуры предварительного нагрева шихты

Снижение ударной прочности при 80°C по сравнению с 50°C обусловлено избыточным обезвоживанием: при удалении значительной доли влаги пластичность бентонитовой суспензии уменьшается, а вместе с ней – способность структуры поглощать динамические нагрузки. Статическая прочность при этом продолжает расти, так как твёрдые связи «концентрат–бентонит–концентрат» при дальнейшем нагреве укрепляются, однако деформационный ресурс материала снижается [5].

Описанный механизм согласуется с данными о реологии бентонитовых суспензий: предельное напряжение сдвига с ростом температуры от 20 до 50°C увеличивается почти вдвое (с 270 до 470 дин/см²), тогда как пластическая вязкость остаётся практически неизменной [2]. Это означает, что при нагреве суспензия становится более структурированной и прочной, не теряя своей пластичности, что благоприятно сказывается на характеристиках окатышей.

Проведённые лабораторные испытания подтвердили существенное влияние температуры предварительного нагрева шихты на механические характеристики сырых железорудных окатышей. Прочность на сжатие

возрастает во всём исследованном диапазоне температур, увеличившись почти в 1,8 раза при переходе от 25°C к 80°C. Ударная стойкость достигает максимума при 50°C (рост в 2,8 раза относительно исходного уровня), после чего несколько снижается вследствие чрезмерного обезвоживания структуры. Оптимальным с точки зрения комплексных механических свойств представляется нагрев шихты до 50°C, обеспечивающий наилучший баланс между капиллярными силами, активностью бентонита и пластичностью материала.

Полученные результаты представляют практический интерес для оптимизации технологии производства железорудных окатышей. Поскольку нагрев шихты до 50°C обеспечивает существенный прирост прочности сырых окатышей, появляется возможность снизить дозировку бентонита с действующего уровня (0,6–0,8% от массы концентрата) до значений, при которых прочность остаётся в пределах нормативных требований (не менее 0,8 кг/ок). Это позволит сохранить качество продукции при сокращении расхода дорогостоящего связующего. Предварительный нагрев шихты следует рассматривать не как способ повышения прочности сверх норматива, а как инструмент оптимизации состава шихты и снижения производственных затрат.

Литература:

1. Тимофеева, А. С. Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья: учебное пособие / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, Е. С. Тимофеев. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 304 с.
2. Витюгин, А. В. Исследование влияния температуры на реологические свойства структурирования поровых суспензий в формованных капиллярно-пористых телах / А. В. Витюгин, В. М. Витюгин, Т. Г. Леонтьева // Известия Томского политехнического университета. – 1975. – С. 3–5.
3. ГОСТ 15054-80. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения содержания влаги. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1980. – 15 с.
4. ГОСТ 25471-82. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1989. – 6 с.
5. Мальцева, В. Е. Исследование влияния бентонитов на формирование элементов структуры и свойств сырых и обожжённых окатышей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / В. Е. Мальцева. – Екатеринбург, 2002. – 180 с.

ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАТА ПРИ ВВЕДЕНИИ В АГЛОШИХТУ РАЗЛИЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Шмаков С.С., Кузин А.В.

Донецкий национальный технический университет

В производстве чугуна в доменных печах доля окискованных железосодержащих материалов достигает 95% и более, и способствует снижению удельного расхода кокса. Выплавка чугуна и стали сопровождается образованием огромного количества железосодержащих отходов, переработка которых в ряде случаев очень затруднена. Известные способы окискования, такие как метод брикетирования и метод экструзии брикетов (брэксов), обладают невысокой производительностью. Для утилизации большого количества железосодержащих отходов, таких как пыль и шлам, агломерационный процесс является наиболее удачным способом. Таким образом, поиск путей для совершенствования производства агломерата и утилизации железосодержащих отходов является актуальным вопросом.

На рис. 1 приведена динамика производства агломерата в РСФСР и России за последние 30 лет.

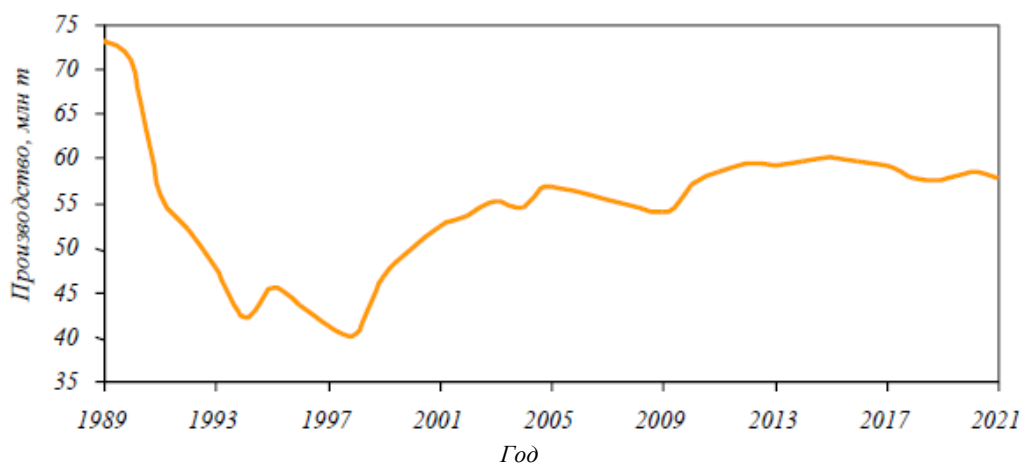


Рисунок 1 – Динамика производства железорудного агломерата в РСФСР и России [1]

На территории России агломерат производят 12 предприятий (без учета новых территорий), причем около 77% агломерата производится на пяти аглофабриках металлургических комбинатов производительностью от 4,5 до 13 млн. т/год: Магнитогорский, Новолипецкий, Северсталь, Западно-Сибирский, Челябинский [1].

За последние 20-25 лет в России на металлургических предприятиях наметилась тенденция к строительству новых или реконструкции старых агломерационных фабрик и установкой агломашин с площадью спекания не менее 100 м². Так, например, в 2019 г. на ММК закончили горячие испытания

на современной агломерационной фабрике № 5. В аглоцехе «Уральская Сталь» была проведена модернизация участка окомкования [1, 2].

Предусмотрено строительство современной аглофабрики повышенной производительностью на территории ДНР. Необходимость создания нового агломерационного производства обусловлена критическим техническим состоянием существующих аглофабрик на Алчевском и Енакиевском металлургических предприятиях [3].

В работах [4, 5] представлены результаты опытно-промышленного эксперимента получения высокоосновного агломерата из концентратов и железосодержащих отходов (с расходом от 100 до 350 кг/т агломерата) с последующей его проплавкой в доменных печах Енакиевского металлургического завода. При увеличении основности агломерата с 2,0 до 5,0 ед. содержание железа в агломерате снизилось с 53 до 32%, содержание FeO – с 17 до 9%, содержание мелочи – с 19 до 16%. Замена в шихте ДП агломерата основностью 2,0 ед. на агломерат основностью 5,0 ед. позволила снизить удельный расход известняка на 124 кг/т чугуна (53%) и, как следствие, сократить расход кокса на 46 кг/т чугуна (8,6%).

В связи с вышесказанным необходимо оценить изменение химического состава агломерата.

Цель работы – аналитически оценить изменение химического состава агломерата при введении в аглошихту железосодержащих отходов.

Для расчета, который осуществляли на 100 кг, задавались следующими исходными данными:

- доля отходов в шихте изменялась от 0 до 30% с шагом 10% при соответствующем изменении расхода концентрата;
- расход аглоруды оставался постоянным и составил 10 %;
- расход коксика принимали 5 кг/100 кг агломерата;
- основность агломерата CaO/SiO_2 изменялась от 1,25 (базовая основность) до 2-4 абс. ед. (с шагом 1);
- содержание в готовом агломерате FeO принимали равным 10 %;
- удаление серы при агломерации принимали 95 %.

Расчет удельного расхода ЖРМ и известняка выполняли на основе данных о сухой массе компонентов аглошихты путем решения двух балансовых уравнений, предложенное Ф.М. Базановым и И.Л. Малкиным [6].

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Результаты расчета химического состава агломерата различной основности сведены и при разной доле отходов в аглошихте приведены в табл. 2. Из рис. 1 видно, что повышение основности от 1,25 до 4 абс. ед. способствует снижению железа на 10%. Кроме того, повышение в аглошихте железосодержащих отходов на каждые 10% содержание железа снижается на 1,4-1,6%. Для сохранения в доменной печи содержания железа в железорудной части шихты необходимо пропорционально увеличивать долю окатышей.

Таблица 1 – Химический состав компонентов аглошихты

Компоненты аглошихты	Fe	Mn	S	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	C	п.п.п
Концентрат	61,78	0,22	0,14	58,56	26,73	5,58	3,06	2,93	1,2	1,28	0,08	0	1,44
Аглоруда	53	0,04	0,05	57,94	16	16	3	0,5	0,8	0,5	0,05	0	3
Смесь отходов	40	0,1	0,2	46,03	10	12	3	10	1	0,5	0,1	11	5
Известняк	0,12	0	0,01	0,18	0	0,89	0,37	54,4	0,68	0	0,03	0	43,44
Коксик	2,15	0,1	1,8	3,07	0	4,83	3,07	0,39	0,15	0,14	0,05	85,5	1,6

Таблица 2 – Расчётный химический состав агломерата, %

Основность, CaO/SiO ₂	Химсостав, %							
	Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Mn	S	P ₂ O ₅
Доля отходов в аглошихте 0%								
1,25	57,11	8,16	6,53	1,16	3,05	0,194	0,011	0,069
2,0	54,27	12,59	6,29	1,17	2,94	0,185	0,010	0,068
3,0	50,78	18,03	6,01	1,17	2,80	0,173	0,010	0,066
4,0	47,61	22,99	5,74	1,17	2,68	0,162	0,010	0,065
Доля отходов в аглошихте 10%								
1,25	55,88	9,03	7,23	1,16	3,09	0,185	0,011	0,074
2,0	52,81	13,88	6,93	1,17	2,96	0,175	0,011	0,073
3,0	49,09	19,75	6,57	1,17	2,81	0,163	0,010	0,070
4,0	45,74	25,05	6,25	1,17	2,67	0,152	0,010	0,069
Доля отходов в аглошихте 20%								
1,25	53,47	11,75	7,83	1,16	3,08	0,173	0,011	0,079
2,0	51,30	15,22	7,58	1,16	2,98	0,166	0,011	0,078
3,0	47,41	21,45	7,14	1,17	2,82	0,154	0,011	0,075
4,0	43,91	27,04	6,75	1,17	2,67	0,143	0,010	0,073
Доля отходов в аглошихте 30%								
1,25	52,08	12,83	8,54	1,16	3,11	0,164	0,012	0,085
2,0	49,81	16,51	8,25	1,16	3,01	0,157	0,011	0,083
3,0	45,69	23,18	7,72	1,17	2,83	0,144	0,011	0,079
4,0	42,10	29,02	7,25	1,17	2,67	0,133	0,010	0,077

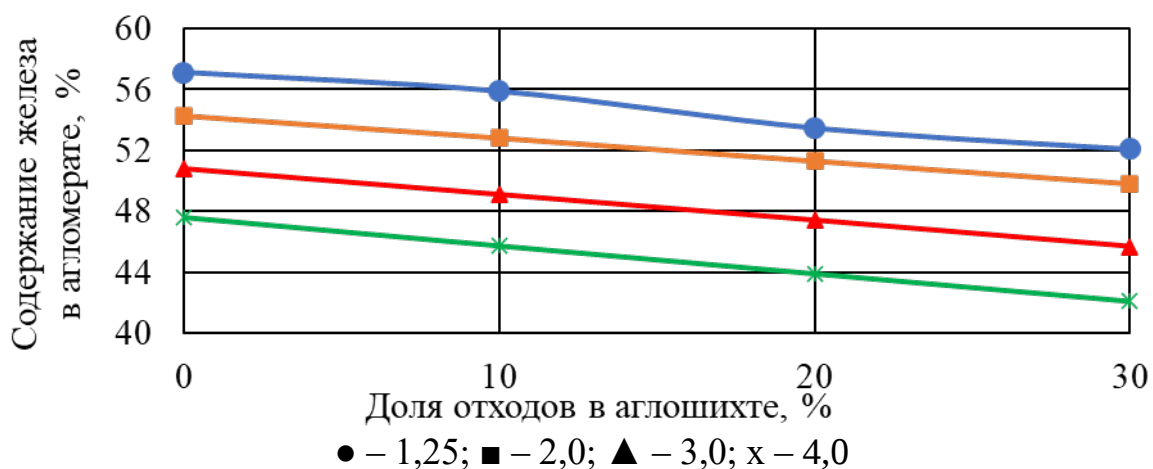


Рисунок 1 – Изменение содержания железа в агломерате при повышении доли отходов в аглошихте при основности

Однако, несмотря на повышение содержания отходов в аглошихте за счет повышения основности агломерата можно ожидать сохранение или даже улучшение прочности агломерата при основности CaO/SiO_2 более 2 абс. ед. на 20-40% (отн.) [7].

Таким образом, повышение основности агломерата CaO/SiO_2 от 1,25 до 4 абс. ед. будет способствовать снижению содержания в нем железа на 10%. Кроме того, повышение в аглошихте железосодержащих отходов на каждые 10% содержание железа снижается на 1,4-1,6%. Для сохранения в доменной печи содержания железа в железорудной части шихты необходимо пропорционально увеличивать долю окатышей. Однако, несмотря на повышение содержания отходов в аглошихте за счет повышения основности агломерата можно ожидать сохранение или даже улучшение прочности агломерата при основности CaO/SiO_2 более 2 абс. ед. на 20-40% (отн.).

Литература:

1. Одинцов, А.А. Современное состояние технологии производства железорудного агломерата в отечественной металлургии // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2022. – № 3 – С. 28-36.
2. Ганин, Д.Р. Модернизация оборудования для подготовки шихты к спеканию в агломерационном цехе АО «Уральская Сталь» / Д.Р. Ганин, А.Ю. Фукс // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79. – № 10. – С. 801-808.
3. ЮГМК планирует строительство аглофабрики в ЛНР мощностью 9 млн. тонн к 2030 г. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/23596179> – Дата публикации: 04 апреля 2025 г.
4. Bobylev, G.S. Full-scale experimental test production of high-basicity sinter in the Enakievo metallurgical plant sinter shop // G.S. Bobylev, A.G. Kovalenko, V.P. Padalka et al. // Metallurgist. – 2020. – Т. 64. – № 7-8. – Р. 741-749.
5. 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. – № 8. – С. 790-802.
6. Базанов, Ф.М. Расчет агломерационных шихт / Ф.М. Базанов, И.Л. Малкин. – Москва : Металлургия, 1964. – 63 с.
7. Вегман, Е.Ф. Металлургия чугуна: учебник / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев [и др.]. – Москва : Академкнига, 2004. – 774 с.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛОМА ПЕРЕД ЗАГРУЗКОЙ В ДУГОВУЮ СТАЛЕПЛАВИЛЬНУЮ ПЕЧЬ НА ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ

Мельниченко М.В., Гнителиев П.А.

Донецкий национальный технический университет

Предварительный подогрев металлолома является одной из наиболее эффективных технологий повышения энергоэффективности и экологичности электросталеплавленного производства. В статье рассмотрены технические принципы, основные преимущества и недостатки данной технологии, приведены реальные промышленные показатели экономии энергии, сокращения времени плавки и снижения эксплуатационных затрат. Особое внимание уделено современным системам подогрева (Consteel®, ECOARC и др.), а также экологическим аспектам процесса. На основе анализа научных публикаций и промышленных данных сделан вывод о высокой эффективности технологии при правильной реализации.

В современном производстве стали на основе металлолома дуговые сталеплавильные печи (ДСП) потребляют значительное количество электроэнергии. Одним из наиболее действенных способов снижения удельного расхода энергии является предварительный подогрев металлического лома за счёт тепла отходящих газов печи перед его загрузкой в рабочее пространство.

Почему важен предварительный подогрев? Отходящие газы ДСП имеют температуру 1200–1500 °С и уносят 15–20 % всей тепловой энергии (80–120 кВт·ч/т стали). Системы предварительного подогрева позволяют использовать это тепло для нагрева лома до 300–800 °С, существенно снижая затраты электрической энергии на расплавление шихты.

Основные преимущества технологии

Реальные промышленные данные подтверждают следующие эффекты:

- энергосбережение: 50–100 кВт·ч/т жидкой стали (13,5–20 %);
- снижение расхода электродов: до 20 %;
- сокращение длительности плавки: около 20 %, что повышает производительность на 10–20 %;
- снижение пылевых выделений: до 30 %;
- общее снижение себестоимости производства: 15–21 %.

Дополнительными преимуществами являются удаление влаги и летучих веществ из лома (снижение рисков взрывов), увеличение срока службы футеровки печи и рост выхода годного.

Современные технологии подогрева

Наиболее распространённые системы:

- корзиночный подогрев (простейший вариант);
- шахтные печи;
- Consteel® (Tenova) — непрерывная подача и подогрев лома

конвейером в туннеле отходящими газами;

– ECOARC, EAF Quantum и другие системы с высокой степенью рекуперации тепла.

Система Consteel® доказала свою эффективность на многих предприятиях мира, включая российские заводы.

Экологические аспекты. Технология способствует снижению удельного потребления электроэнергии и, соответственно, выбросов CO₂. Однако при использовании загрязнённого лома существует риск образования диоксинов и фуранов в температурном диапазоне 250–450 °С. Современные установки решают эту проблему путём предварительной подготовки лома, вторичного дожигания газов и быстрого охлаждения.

Предварительный подогрев металлического лома перед загрузкой в дуговую сталеплавильную печь представляет собой высокоэффективную, технически отработанную технологию, которая позволяет существенно снизить энергопотребление, повысить производительность и улучшить экологические показатели производства стали. При правильном выборе оборудования и качественной подготовке шихты технология демонстрирует быструю окупаемость и вносит значительный вклад в устойчивое развитие металлургической отрасли. Дальнейшее развитие систем подогрева в сочетании с цифровизацией процессов сделает электросталеплавильное производство ещё более конкурентоспособным и экологичным.

Литература:

1. ACEEE. Innovative Energy Conservation through Scrap Pre-heating in an Electric Arc Furnace : proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry. 2013. URL: https://www.aceee.org/files/proceedings/2013/data/papers/1_175.pdf.

2. Consteel Electric Arc Furnace Process [Электронный ресурс] // IspatGuru. 2020. URL: <https://www.ispatguru.com/consteel-electric-arc-furnace-process/> (дата обращения: 16.04.2026).

3. Scrap Metal Preheating: A Guide to Methods, Benefits & Technologies [Электронный ресурс] // Okon Recycling. 2025. URL: <https://www.okonrecycling.com/industrial-scrap-metal-recycling/steel-and-aluminum/scrap-metal-preheating-process/> (дата обращения: 12.04.2026).

4. Consteel® EAF [Электронный ресурс] // Tenova. URL: <https://tenova.com/technologies/consteelr-eaf> (дата обращения: 12.05.2026).

8. The most advanced power-saving technology in EAF — Introduction to ECOARC [Электронный ресурс] // Steel Plant Technologies. URL: <https://steelplantech.com/assets/pdf/technology/The-most-advanced-power-saving-technology-in-EAF-Introduction-to-ECOARC.pdf> (дата обращения: 12.04.2026).

9. Бирюков, А. Б. Утилизация теплоты газов, отходящих из дуговой сталеплавильной печи, с целью предварительного подогрева металлолома // Вестник Донецкого национального технического университета, 2020 – № 2 (20) – С. 26–32. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43799765> (дата обращения: 12.04.2026).

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ ОКАТЫШЕЙ В ОБЖИГОВОЙ МАШИНЕ

Купцова Д.А., Скляр В.А.

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова» (филиал)
НИТУ «МИСИС»

Одним из основных параметров, влияющих на показатели производительности обжиговой машины является скорость фильтрации в слое окатышей, расположенных на колосниковой решетке [1]. Скорость фильтрации зависит как от параметров слоя окатышей, так и от перепада давления на колосниковом поле, которое в свою очередь зависит от сопротивления самого колосникового поля [2]. Таким образом, уменьшая сопротивление колосникового поля, можно повысить скорость фильтрации и, соответственно, производительность обжиговой машины [3].

На АО «Лебединский ГОК» используются 4 обжиговых машины типа ОК-306 [4]. В которых установлены в качестве базового решения колосники типа ФБП (рис. 1) .



Рисунок 1 – Колосник обжиговой машины

Объектом данного исследования являются особенности газодинамических явлений процесса обжига окатышей.

Цель данной работы заключается в разработке и верификации компьютерной модели газодинамических процессов в слое окатышей на колосниковой решетке обжиговой машины.

Для моделирования процесса была разработана компьютерная модель в пакете Comsol Multiphysics (лицензия № 9601386). В качестве геометрической модели использовалась часть колосникового поля, состоящая из четырёх колосников (моделировались шесть щелей между колосниками) и слой окатышей над ними высотой 400 мм. Расчетная область (газовая фаза) с учетом плоскостей симметрии показана на рис. 1. Поскольку дальнейшие исследования

с использованием модели планировались с целью изучения влияния геометрических параметров щели между колосниками на газодинамику слоя, то остальные элементы геометрии колосника были упрощены. Размеры моделируемой щели прямоугольной формы составляли 6x92 мм, размеры тела колосника 40x40 мм, длина всего колосника 314 мм.

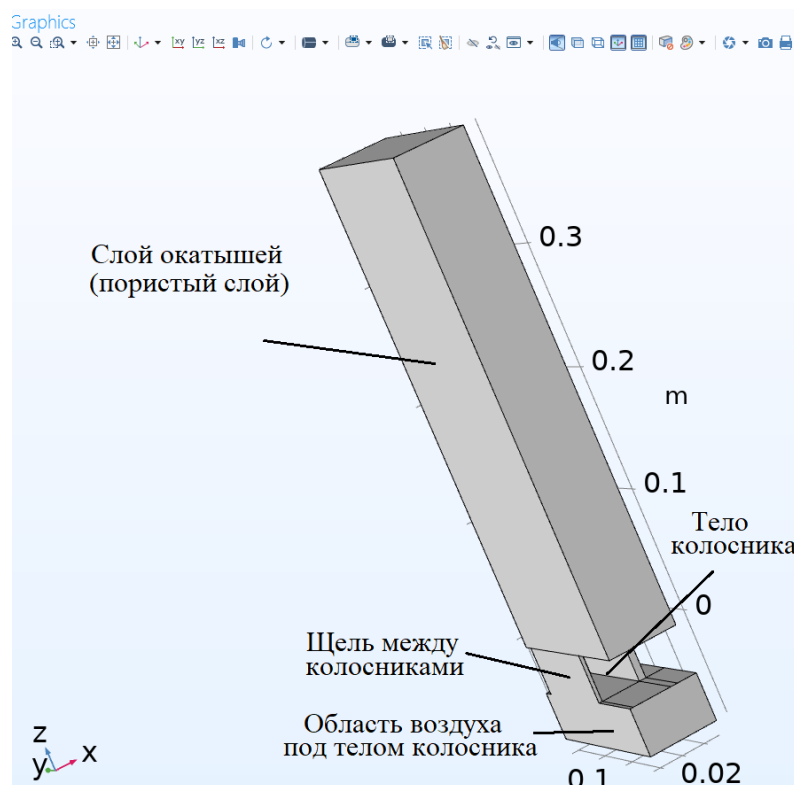


Рисунок 2 – Расчетная область

В качестве физического интерфейса использовалась модель Free and Porous Media Flow, которая позволяет учитывать границу раздела потоков свободной и пористой сред, что важно для решения данной задачи. Модель используется для расчета полей скорости и давления жидкости в однофазном потоке, где свободный поток соединен с пористой средой. Течение газа в пористых средах, описывается уравнениями Бринкмана, а течение в каналах - уравнениями Навье-Стокса [5]. Решение осуществлялось в стационарной постановке. В качестве моделирующей среды использовался воздух, свойства которого задавались в зависимости от температуры. Порозность слоя окатышей составляла 0,34. В качестве граничных условий потока задавался перепад давления между входом и выходом в 3000 Па, согласно заводским данным.

В результате расчета получали поля скоростей и давлений по телу модели.

Поля скоростей по горизонтальным сечениям модели приведены на рис. 3. Видно, что максимального значения скорость достигает в щели между колосниками, где скорость достигает 42 м/с. В нижней части слоя окатышей наблюдается существенная неравномерность скоростей, которая постепенно исчезает с ростом высоты слоя. Данный факт приводит к неровному обжигу окатышей что сказывается на стабильности их параметров качества.

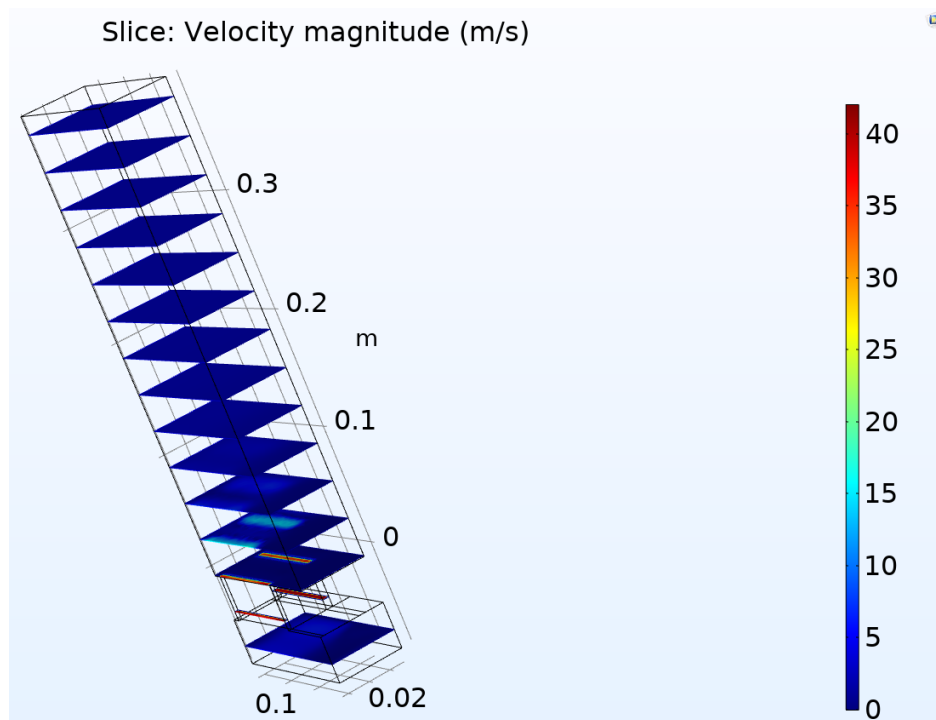


Рисунок 3 – Поля скоростей в горизонтальных сечениях исследуемой области

Как видно из графика скорости на плоскости симметрии (рис. 4) стабилизация скорости по сечению наблюдается на высоте слоя окатышей в 150 мм. Это видно и из анализа изолиний в сечениях, расположенных на высоте слоя окатышей в 12 и 150 мм (рис. 5).

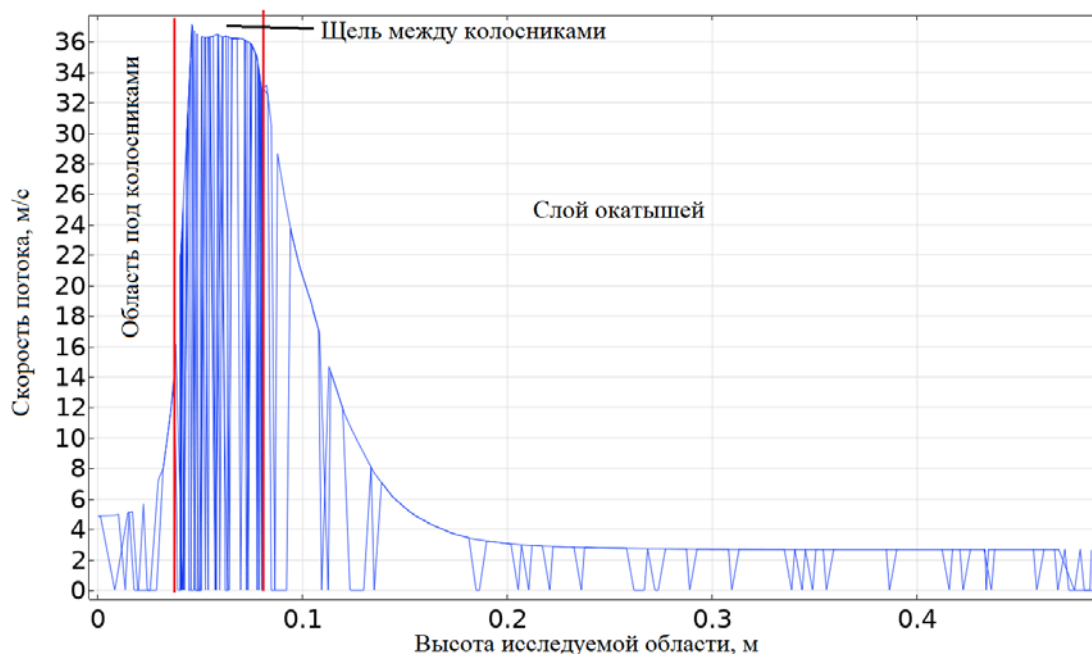


Рисунок 4 – Скорость потока по плоскости симметрии

В нижней части слоя (рис. 5, а) наблюдается значительная неравномерность скоростей в виде множества изолиний, разница между которыми (если не учитывать пристеночные области, поскольку скорость по

стенкам равна 0 по условию непроницаемости) составляет 14,97 м/с. В то время как на высоте 150 мм в основной области заметно всего 2 изолинии, разница между которыми составляет 0,33 м/с. Таким образом можно говорить, что с целью повышения качества производимых окатышей необходимо стремиться к уменьшению неравномерности скоростей в нижней части слоя и уменьшению высоты на которой достигается стабилизация скорости.

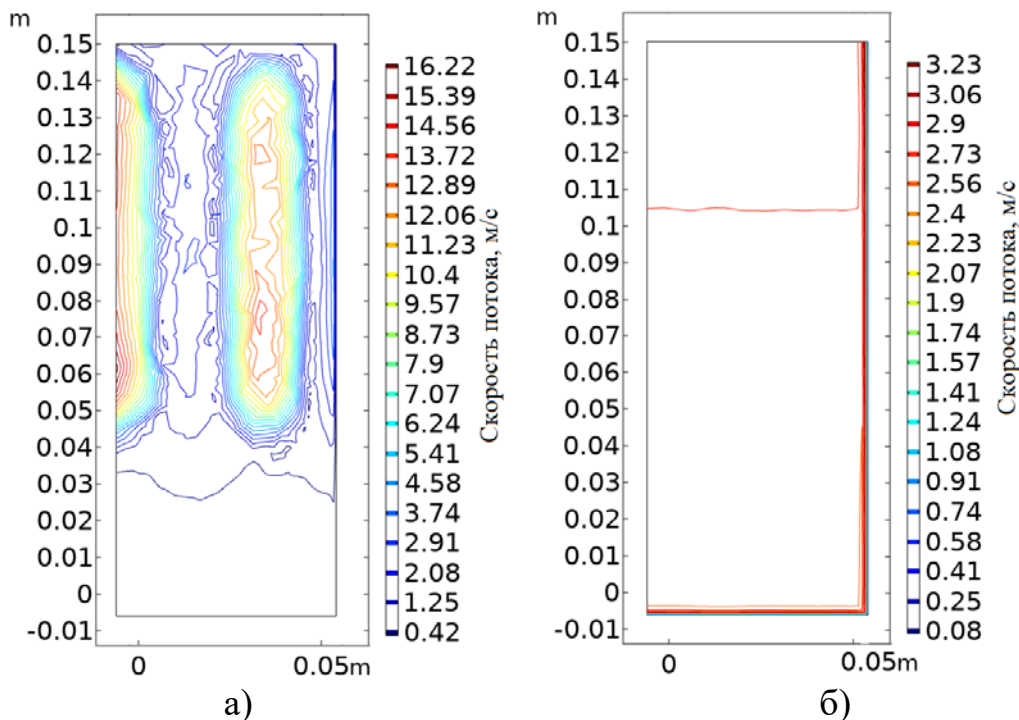


Рисунок 5 – Изолинии скорости потока в сечениях на высоте слоя окатышей 12 мм (а) и 150 мм (б)

Еще одной из характеристик сопротивления колосникового поля является перепад давления, который показан на рис. 6.

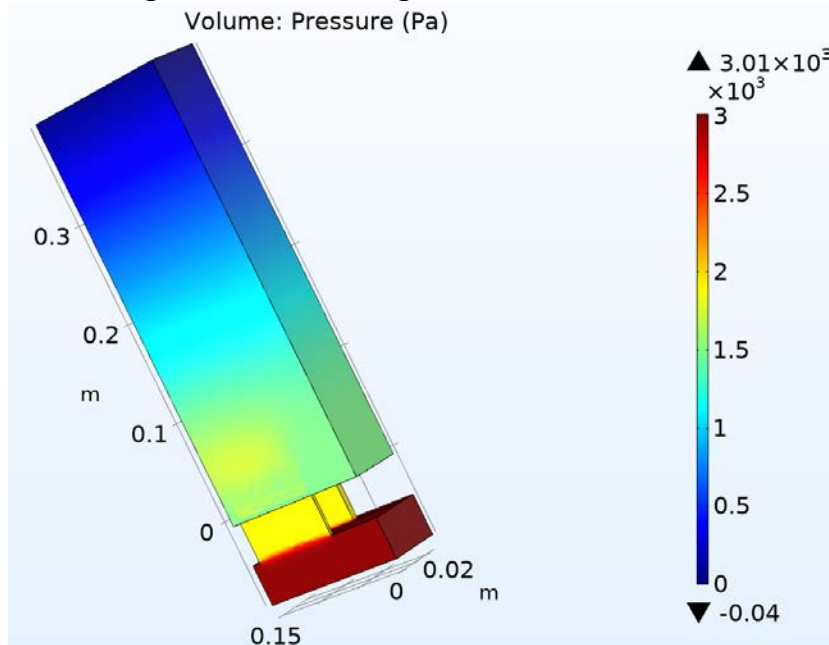


Рисунок 6 – Распределение перепада давления по объему модели, Па

Результаты верификации модели по заводским данным приведены в табл. 1, отклонения не превышают 2 %.

Таблица 1 – Верификация модели

Параметр	Заводские данные	Расчет по модели	Отклонение, %
Скорость фильтрации, м/с	0,91	0,904	0,66
Перепад давления, Па	3000	3050	-1,67

Таким образом, разработанная компьютерная модель по результатам верификации может быть использована для анализа газодинамических процессов в слое окатышей, расположенных на колосниковой решетке обжиговой машины. Расчеты показывают существенную неравномерность полей скоростей внизу слоя окатышей, поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены не только на повышение скорости фильтрации, но и уменьшения данной неравномерности.

Литература:

1. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин [и др.]. – Екатеринбург : ООО "Научно-производственное предприятие "МИЦ", 2015. – 335 с.
2. Кривоносов В.А., Пирматов Д.С. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима // Вестник ВГТУ. – 2010. – №5. – С. 128-132.
3. Теплофизика получения окисленных окатышей : учебное пособие при подготовке магистров, обучающихся по направлению "Металлургия" / А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко, Е.С. Тимофеев, В.В. Федина. – Старый Оскол : ТНТ, 2020. – 138 с.
4. Модернизация обжиговых машин второго поколения ОК-306 : Учебник / Селезнев В.С., Шатохин Е.М., Киреевков А.Н. [и др.] – Старый Оскол : ТНТ, 2025. – 468 с.
5. Фильтрационные течения в пористых средах / Е. И. Коленкина, В. Ф. Никитин, О. А. Логвинов, Н. Н. Смирнов ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук. – Москва : ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2020. – 73 с.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ СТАЛИ

Беляев В.В., Корзун Е.Л., Цымбаленко А.В.
Донецкий национальный технический университет

Сера является важнейшим элементом, влияющим на усталостные свойства стали, вызывает термическое охрупчивание большинства сталей, ухудшая их технологические свойства [1-4]. Таким образом, содержание серы в стали должно быть сведено к минимуму. В настоящее время десульфурация проводится либо в трёх технологических процессах: предварительная обработка жидкого чугуна, кислородно – конвертерный процесс и рафинирование стали на внепечных агрегатах (наиболее часто это ковш-печь и вакууматор), либо в двух технологических процессах: выплавка стали в дуговой электросталеплавильной печи и рафинирование стали на внепечных агрегатах.

Анализ распределения массовых потоков серы в указанных выше процессах, проведенный в работе Шрамы с сотрудниками [5], показал, что существенная часть серы удаляется в газовую фазу, однако в рафинировочных процессах доля серы, перешедшей в газовую фазу, ниже доли серы, перешедшей в шлак. Подбор оптимальной композиции рафинировочного шлака [6-9] практически исчерпал рост технологических возможностей рафинирования по сере.

С другой стороны, многочисленные данные о поведении серы в системе металл-шлак-газ, собранные Г.Д. Молоковым, Г.Н. Ойксом, Г. Нейхаузом, В.А. Григоряном, Ю.В. Латашем, М.М. Ключевым, А.Ф. Каблуковским, Б.И. Медоваром, Г.И. Котельниковым и др. при анализе выплавки стали в мартеновских печах, кислородных конвертерах, электродуговых печах и при электрошлаковом переплаве показали, что состав газовой фазы агрегата, а в бóльшей мере, парциальным давлением кислорода, влияет на величину потока серы из металла в шлак. Таким образом, направленное изменение состава газовой фазы на границе раздела шлак-газ может обеспечить изменение эффективности процесса перехода серы из шлака в газовую фазу снижая насыщенность шлака серой и тем самым обуславливая дополнительный её переход из металла в шлак.

Финчем и Ричардсон показали, что растворимость серы в шлаке, сульфидная емкость шлака и коэффициент распределения серы в шлаке $37\% \text{ CaO}-27\% \text{ Al}_2\text{O}_3-36\% \text{ SiO}_2$ зависят от парциального давления кислорода в газовой фазе [10]. По их данным при $P_{\text{O}_2} = 10^{-7} - 10^{-5} \text{ МПа}$ ($10^{-6} - 10^{-4} \text{ атм.}$) шлаки обладают минимальной растворимостью по сере, возрастающей при

изменении парциального давления кислорода как в сторону уменьшения, так и в сторону повышения.

В реальных сталеплавильных процессах существует градиент окисленности шлака направленный от межфазной границы шлак-металл к границе раздела шлак-газовая фаза. На границе раздела металл – шлак $P_{O_2} \approx 10^{-10}$ МПа, а на границе раздела шлак – газовая фаза - $P_{O_2} \approx 10^{-2}$ МПа. Следовательно, в объёме шлака существует слой с окисленностью соответствующей $P_{O_2} = 10^{-6}$ МПа. Этот слой не растворяет в себе серу и препятствует транспортировке серы из металла к границе шлак-газовая фаза (см. рис.1).

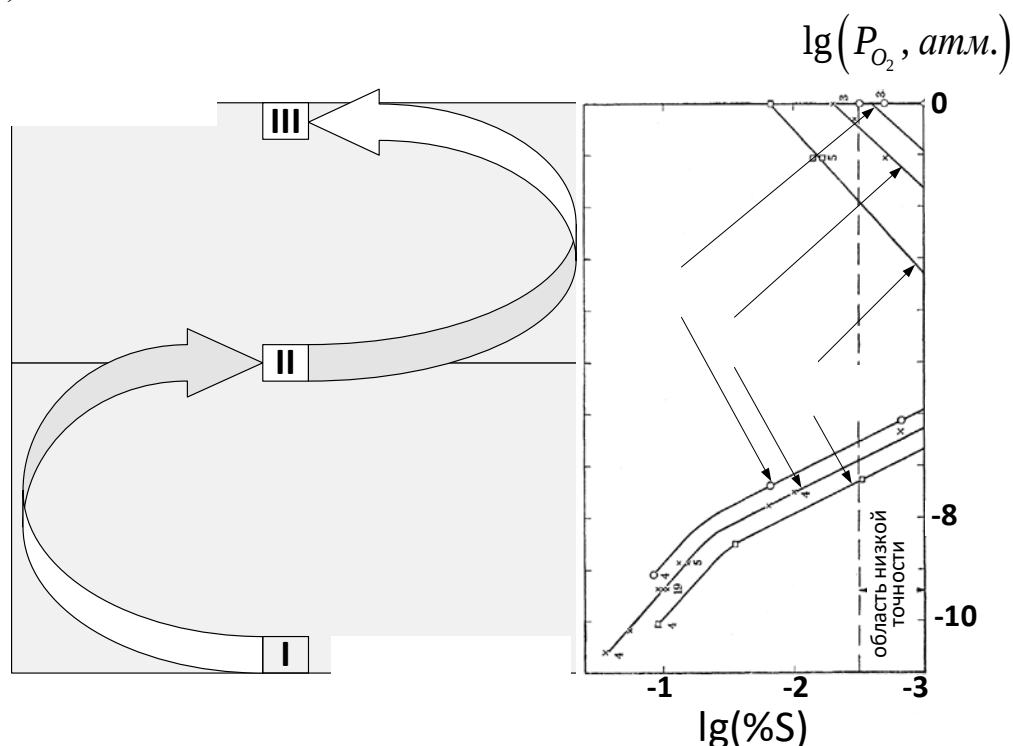


Рисунок 1 – Схема изменения растворимости серы в порции шлака при наличии слоя с минимальной растворимостью, правая сторона рисунка – это диаграмма, приведенная авторами работы [10]

Возможно, что при установлении парциального давления кислорода на границе шлак – газовая фаза $P_{O_2} = 10^{-6}$ МПа, сера может удаляться из шлака переходя в газовую фазу с увеличенной интенсивностью. При этом активизируется переход серы через границу металл-шлак и усиливается весь процесс десульфурации металла. шлак работает, как своеобразный насос по "перекачке" серы из металла в газовую фазу.

Для обеспечения контролируемого значения парциального давления на поверхности раздела шлак – газовая фаза предлагается использовать тангенциальный обдув поверхности шлака смесями технологических газов

воздуха, аргона, природного газа, азота, углекислого газа. Для расчета состава указанных смесей, обеспечивающих парциальное давление кислорода $P_{O_2} = 10^{-6}$ МПа при температуре 1600°C провели термодинамические расчеты в программе «ТЕРРА» [11].

Исходные условия для термодинамических расчётов.

- 1) Химический состав конденсированной фазы системы – шлака – соответствует шлаку, использованному Финчемом и Ричардсоном [10], % масс.: 37% CaO-27% Al₂O₃-36% SiO₂. Масса шлака 100 г.
- 2) Химический состав компонентов газовой фазы системы:
 - воздух (на основе данных работы [12], с относительной влажностью 80% при температуре 25°C) % масс. – 74,355 % N₂, 22,789% O₂, 1,268 % Ar; 1,532 % H₂O; 0,053% CO₂; $9,38 \cdot 10^{-5}$ % CH₄; $4,64 \cdot 10^{-5}$ % N₂O; $1,14 \cdot 10^{-5}$ % CO; $3,43 \cdot 10^{-6}$ % H₂; $5,79 \cdot 10^{-6}$ % NH₃; $1,56 \cdot 10^{-7}$ % NO₂; $4,36 \cdot 10^{-8}$ % H₂S; $2,32 \cdot 10^{-8}$ % H₂S;
 - аргон, высший сорт по данным стандарта [13] % масс. – 99,995 % Ar; $3,506 \cdot 10^{-3}$ N₂; $5,61 \cdot 10^{-4}$ O₂; $4,06 \cdot 10^{-4}$ H₂O; $5,51 \cdot 10^{-4}$ CO₂;
 - аргон, первый сорт по данным стандарта [13] % масс. – 99,99 % Ar; $7,013 \cdot 10^{-3}$ N₂; $1,602 \cdot 10^{-3}$ O₂; $4,51 \cdot 10^{-4}$ H₂O; $5,51 \cdot 10^{-4}$ CO₂;
 - углекислый газ – 100% масс. CO₂;
 - угарный газ – 100% масс. CO;
 - метан - 100% масс. CH₄.
- 3) Масса газовой фазы – 100 г.
- 4) Температура – 1873 К.
- 5) Давление – 0,101325 МПа.

В результате расчетов равновесного парциального давления кислорода в системе шлак – газ получены следующие составы смесей технологических газов, для которых давление кислорода находится близко, но не выше значения 10^{-6} МПа:

- для смеси углекислый газ – угарный газ – 80% масс. CO₂ – 20 масс. CO, $P_{O_2} = 1,115 \cdot 10^{-6}$ МПа;
- для смеси аргон высшего сорта – углекислый газ – 98,5% масс. Ar – 1,5% масс. CO₂, $P_{O_2} = 1,107 \cdot 10^{-6}$ МПа;
- для смеси аргон первого сорта – углекислый газ – 98,5% масс. Ar – 1,5% масс. CO₂, $P_{O_2} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ МПа;
- для смеси воздух – метан – 94% масс. воздуха – 6% метана, $P_{O_2} = 1,397 \cdot 10^{-6}$ МПа;

При равновесии с азотом технической чистоты равновесное парциальное давление кислорода составляет $P_{O_2} = 2,504 \cdot 10^{-3}$ МПа.

Выводы.

1. Естественный градиент окисленность шлака по толщине слоя создаёт в шлаке слой, препятствующий транспортировке серы из металла к границе шлак-газовая фаза.

2. Для устранения образования такого слоя предлагается обдув поверхности раздела смесями технологических газов, состав которых обеспечивает значение парциального давления кислорода не выше 10^{-6} МПа.
3. Расчет составов равновесных газовых смесей над шлаком 37% CaO-27% Al₂O₃-36% SiO₂ показал, что граничное содержание газа окислителя ($P_{O_2} = 10^{-6}$ МПа) достигается для четырёх вариантов смесей углекислый газ – угарный газ, аргон высшего сорта – углекислый газ, аргон первого сорта – углекислый газ, воздух – метан.

Литература:

1. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев, А.А. Гуляев. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва: Альянс, 2011. – 643 с.
2. Металловедение. Сталь: Справ.: В 2 т. (4-х кн.) Т.2. Применение (книга вторая) / Сост.: В. Енихе и др.]; Пер. с нем. И.М. Копьева, В.А. Федоровича; Под ред. С.Б. Масленкова – Москва: Металлургия, 1995 – 399с.
3. Лунев, В.В. Сера и фосфор в сталях / В.В. Лунев, В.В. Аверин – Москва: Металлургия, 1988. – 257с.
4. Holappa, L. Secondary Steelmaking. Chapter 1.7 / L. Holappa, A.C. Nava // Treatise on Process Metallurgy (Second Edition). Volume 3: Industrial Processes. Editor(s): S. Seetharaman, R. Guthrie, A. McLean, Sr. Seetharaman, H.Y. Sohn – Elsevier, 2024. – P.267-301.
5. Schrama, F.N.H. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking / F.N.H. Schrama, E.M. Beunder, B. van den Berg et al. // Ironmaking & Steelmaking – 2017, vol.44. iss.5. – P.333-343.
6. Basu, S. Thermodynamics of Phosphorus and Sulphur Removal during Basic Oxygen Steelmaking / S. Basu, S. Seetharaman, A.K. Lahiri // Steel research international – 2010, vol.81, iss.11 – P.932-939.
7. Kang, J.G. Effect of Slag Chemistry on the Desulfurization Kinetics in Secondary Refining Processes / J.G. Kang, J.H. Shin, Y. Chung et al. // Metallurgical and Materials Transactions B – 2017, vol.48, iss.4 – P.2123-2135.
8. Qiu, G. Research Progress of Desulfurization Refining Slag: A Review / G. Qiu, H. Zhang, P. Gao et al. // Steel research international – 2024, vol.95, iss.1 – SP: 2300333. – 11p.
9. Авраменко, Н.А. Прогнозирование результатов десульфурации стали / Н.А. Авраменко, М.А. Нетесов, Н.А. Куц // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2024, № 23. – С. 43-51.
10. Финчем, С.Дж.Б. Поведение серы в силикатных и алюминатных расплавах / С.Дж.Б. Финчем, Ф. Ричардсон // Проблемы современной металлургии - 1955, №1. – С.5-24. Переведено на русский с оригинала: Fincham, C.J.B. The behaviour of sulphur in silicate and aluminate melts / C.J.B. Fincham, F.D. Richardson // Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical & Engineering Sciences – 1954, vol. 223 – P.40-62.
11. Трусков, Б.Г. Описание программ термодинамического расчета состава произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 90с.
12. Walker, J.C.G. Evolution of the atmosphere – New York: Macmillan, 1977 – 318p.
13. ГОСТ 10157-79. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 19с.

РЕГРЕССИОННАЯ ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Крестин Р.В., Должиков В.В.

Донбасский государственный технический университет

Доменное производство представляет собой сложный технологический процесс переработки металлургического сырья в масштабных агрегатах. Специфика данного производства обуславливает необходимость разработки эффективных методов контроля и прогнозирования его параметров.

Математическое моделирование доменного процесса требует комплексного подхода, учитывающего физико-химические, теплообменные и газодинамические процессы. В современной практике применяются два основных направления моделирования:

- физико-математическое моделирование на основе фундаментальных законов [1, 2]
- использование различных числовых алгоритмов (статистических, машинного обучения, ИИ, др.) [3, 4].

Эти методы, – по мнению авторов, – обладают достаточной точностью и быстротой расчета, а также могут устанавливать характеристики процесса при ограниченных сведениях о его физической структуре. Но, пока все они могут использоваться только в режиме «советчик мастера».

Основными целями настоящего исследования являются:

- получение оценки влияния различных факторов на производительность доменной печи [2],
- создание статистической модели для оперативного прогнозирования производительности доменной печи [5].

Для исследований были предоставлены технологические данные о работе доменной печи. На печи выплавляли передельный чугун. В шихте использовали агломерат и окатыши, иногда добавляли в небольших количествах марганцевую и железную руду, конвертерный шлак. Топливо – кокс и природный газ. Данные содержали сведения об основных технологических параметрах доменной плавки и были агрегированы посуточно.

Исходные данные были «засорены» пропусками (остановки печи), сведениями в нестабильные периоды работы («тихий» ход, краткосрочные остановки) выбросами (резко выделяющимися значениями), др. Такие данные были удалены. По поводу выбросов обозначился следующий подход. Решение об использовании выброса принимает исследователь. Если таких оснований нет – выброс должен быть удален. Количество удаленных из первичного набора наблюдений превысило 40 ед. Таким образом, для исследования была сформирована выборка в 398 наблюдений. На рис. 1 показано распределение производительности по суткам в выборке. Суточное производство приведено в процентах от среднего значения в выборке.

При создании модели провели выбор факторов влияющих на производительность доменной печи (ПЧ, т/сут.) с использованием

корреляционного анализа, включив в рассмотрение 24 фактора. Это регулируемые и контролируемые технологические факторы, которые по общим представлениям, могут изменяться совместно с производительностью [1, 2]. Полученные результаты показали: парные коэффициенты корреляции между производительностью и факторами изменяются от 0,02 до 0,49.

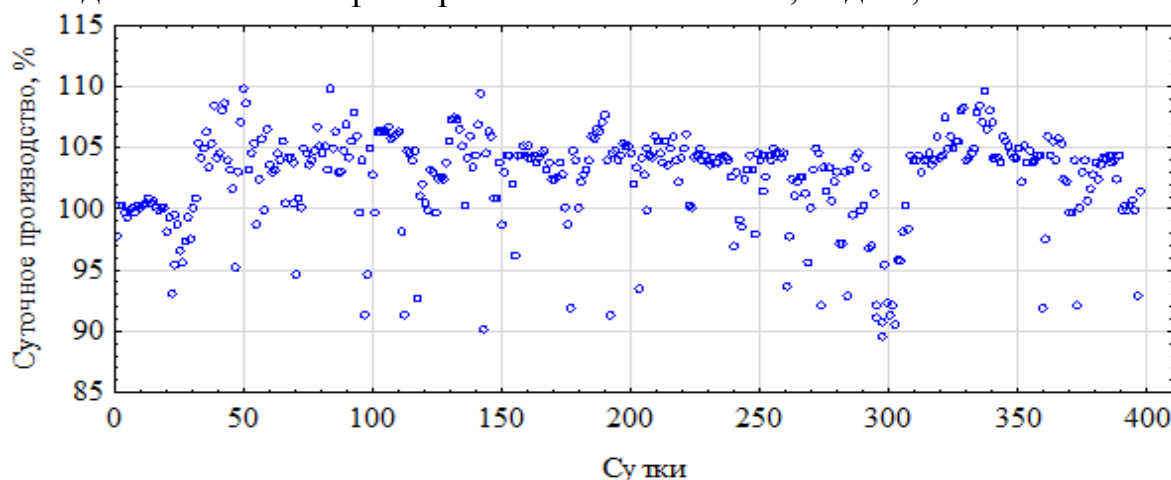


Рисунок 1 – Распределение производительности по суткам в выборке

Исходя из профессиональных сведений в области доменного производства для создания модели выделили 5 статистически значимых факторов, характеризующих влияние шихтовых условий, дутьевого режима и газодинамики процесса: А — содержание железа в железорудной части шихты ($Fe_{ж.р.}$, %), Б — содержание кислорода в дутье ($O_{2д}$, %), В — расход дутья ($V_{д}$, м³/мин), Г — температура дутья ($T_{д}$, °C), Д — давление под колошником ($P_{к}$, атм).

Закон распределения переменных несколько отличался от нормального. Поэтому в табл. 1 указаны коэффициенты корреляции Пирсона ($R_{П}$) и Спирмена ($R_{С}$).

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции между ПЧ и факторами модели

Переменная		А	Б	В	Г	Д
ПЧ	$R_{П}$ (Пирсон)	0,11	0,19	0,45	0,22	0,42
	$R_{С}$ (Спирмен)	0,10	0,17	0,39	0,20	0,18

Существенные различия в коэффициентах по фактору Д указывают на значительные отклонения от нормального распределения значений этого фактора и меньшую достоверность оценки связи.

Прогнозная статистическая модель выглядит следующим образом

$$ПЧ = a_0 + a_1 \cdot A + a_2 \cdot B + a_3 \cdot V + a_4 \cdot T + a_5 \cdot D,$$

где $a_0 \dots a_5$ – параметры регрессионного уравнения.

Параметры рассчитывали по методу наименьших квадратов используя данные о работе печи за различные временные промежутки (ВП). Для этого на временной шкале выбирали контрольную точку (сутки), за которой находится прогнозируемые сутки. От этой точки в обратном направлении (т. е. на участке, где имеются данные о работе печи) формировали выборку (ВП) заданного объема, например, 10 суток [2]. Полученную модель использовали для прогнозного расчета ПЧ за контрольной точкой (следующие сутки).

Повторяли расчет параметров, используя выборку (ВП) объема 20 суток. Полученные значения прогноза позволяют оценить качество моделей в зависимости от ВП.

Для проведения исследований были намечены 2 группы точек. Первая группа содержала контрольные точки: 260-е, 261-е, 262-е и 263-е сутки. Вторая группа – контрольные точки: 294-е, 295-е, 296-е и 297-е сутки. Основанием для выбора послужила оценка работы печи в этих периодах: средняя производительность составляла 99,6% и 93,4% при одинаковом рассеянии. Это характерные изменения ПЧ при нормальной работе агрегата. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты прогнозирования ПЧ, %

№ суток	факт	прогноз		Средняя ошибка (абсолютная)
		ВП – 10 сут.	ВП – 20 сут.	
260	104,4	105,1	103,0	-0,35
261	93,7	104,4	103,1	10,05
262	97,7	95,3	96,8	-1,65
263	102,4	100,3	100,2	-2,15
294	101,1	101,3	101,5	0,30
295	92,0	94,6	86,0	-1,70
296	91,1	98,5	99,3	7,80
297	89,6	94,9	95,4	5,55

Приведенные результаты свидетельствуют об ухудшении прогноза для периодов существенных колебаний фактической ПЧ и могут достигать 10 %. Поэтому при отклонении этого параметра от прогнозной величины более чем на 2–3 % необходим анализ причин и при необходимости внесение изменений в используемую статистическую модель.

Таким образом разработанная модель позволяет осуществлять краткосрочное прогнозирование производительности доменной печи в режиме реального времени при небольших колебаниях входных параметров.

Литература:

1. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Монография. 2-е издание / И. Г. Товаровский. Днепропетровск: Пороги, 2009. 768 с.
2. Товаровский И. Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Сталь. 2014. № 5. С. 4 – 11.
3. Барбасова Т.А. и др. Применение методов машинного обучения для прогнозирования производительности доменной печи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 48 – 50.
4. Барбасова Т.А. Применение нейронной сети для определения режимов работы доменной печи // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. 2021. Т. 9. № 2. С. 17 - 20.
5. Орлов А.И. Многообразие моделей регрессионного анализа (обобщающая статья) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 5. С. 63 – 73.

ЕДКИЙ НАТР И АДСОРБЦИЯ ВЛАГИ БЕНТОНИТОМ

Лихтина Е.Ю., Шевцова Л.А., Ермоленко К.А. Тимофеева А.С.
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова» (филиал)
НИТУ «МИСИС»

Высокий научный интерес к бентонитовым глинам связан с их универсальностью и востребованностью в самых разных отраслях промышленности — от легкой промышленности и заканчивая черной металлургией. На основе изученных литературных источников, бентонитовые глины относятся к осадочным породам с различным физико-химическим составом. [1]. В процессе производства железорудных окатышей бентонитовая глина является неотъемлемой частью, так как ее свойства напрямую влияют на прочностные свойства окатышей окатышей. Однако изучив литературные источники выяснено, что свойства бентонита можно улучшить. Наша статья посвящена улучшению гидрофильных свойств бентонита с помощью щелочного раствора гидроокиси натрия (NaOH).

Окомкование является оптимальным методом окускования железорудного сырья, оно обеспечивает высокую временную и экономическую эффективность. Тонкоизмельченный железорудный концентрат при оптимальном увлажнении обладает неплохой комкуемостью и позволяет формировать сырые гранулы, однако в процессе сушки они имеют очень низкую механическую прочность [2]. В связи с этим для повышения прочностных свойств окатышей в шихту добавляют связующие добавки. За все время развития металлургии самым эффективным связующим веществом остаются бентонитовые глины. Основные свойства бентонита, определяющие качество получаемых окатышей, являются его высокая гидрофильность (набухаемость), водопоглощающая способность и способность к разжижению.

Природный бентонит имеет широкое многообразие видов, они различаются минералогическим и физико-химическим составом, внешним видом, а так же степенью водопоглощения. В зависимости от преобладающего катиона в обменном комплексе выделяют две основные разновидности: щелочные (аскангели) и щелочноземельные (асканглины).

Во влажном состоянии щелочные бентониты характеризуются высокой пластичностью, образуя при смачивании мягкую пастообразную массу. В отличие от них, щелочноземельные разновидности (суббентониты) обладают плотной, комкообразной, можно сказать каменистой структурой; при контакте с водой они не формируют пастообразную массу или устойчивую суспензию, а быстро оседают в виде осадка [1].

Ключевым фактором, определяющим качество и пригодность бентонита, для металлургического передела, является степень его дисперсности, которая напрямую зависит от состава обменного комплекса. Преобладание одновалентных катионов щелочных металлов (преимущественно натрия) в диффузном слое способствует значительному росту дисперсности.

Высококачественные щелочные бентониты, содержащие более 90% тонкодисперсной фракции, обогащены обменным натрием, что обеспечивает их глубокое диспергирование в водной среде. Прочное межмолекулярное взаимодействие между частицами глины и молекулами воды позволяет формировать устойчивые суспензии, сохраняющие их во взвешенном состоянии в течение длительного времени. И напротив диффузном слое щелочноземельных бентонитов доминируют малогидратированные двухвалентные катионы кальция и магния. Они обладают более высокой энергией связи, и в водной среде порода распадается лишь на крупные частицы. Из-за низкой дисперсности такие системы быстро коагулируют и выпадают в осадок, будучи неспособными к длительному поддержанию кинетической устойчивости.

К числу основных физико-химических свойств бентонитовых глин относится их высокая набухаемость, выражающаяся в способности поглощать значительные объемы влаги и увеличиваться в 15–20 раз и более. Вода по капиллярам проникает к первичным частицам бентонита и образует вокруг них водные оболочки. Вследствие этого происходит удаление частиц друг от друга, что и способствует сильному увеличению общего объема глины.

Из-за ограниченного числа отечественных исследований, посвященных щелочной активации бентонитовых глин, в нашей статье был проведен детальный анализ зарубежного опыта. В частности, подробно рассмотрены труды иранских исследователей [3, 4], описывающие влияние гидроксида натрия на гидрофильные свойства бентонита. В рамках их экспериментальной работы были подготовлены четыре различных по соотношению компонентов состава системы «NaOH – бентонит – вода». Для обеспечения высокой статистической достоверности результатов измерения проводились в рамках четырех временных интервалов: 1, 2, 4 и 24 часа. На каждом этапе фиксировался объем поглощенной глиной влаги и оценивалось влияние щелочной добавки на свойства материала.

Динамика изменения водопоглощения в указанные промежутки времени приведена на рис. 1. Представленные графические данные показывают, что в течение первого часа интенсивность поглощения влаги бентонитом превышает 350%. В последующие периоды скорость процесса снижается, и кривая приобретает пологий (затухающий) характер. Это свидетельствует о том, что за первый час слоистая структура бентонита удерживает около 78% от общего объема влаги, поглощаемой им за сутки.

Сравнительный анализ временных интервалов водопоглощения показывает, что наиболее интенсивно процесс гидратации протекает именно в течение первого часа. С технологической точки зрения это обосновывает высокую эффективность активации бентонита едким натром для производства железорудных окатышей. Поскольку операции окомкования шихты и начальная стадия термической обработки сырых окатышей укладываются именно в этот временной интервал, модифицированное связующее успевает полностью реализовать свой гидрофильный потенциал.

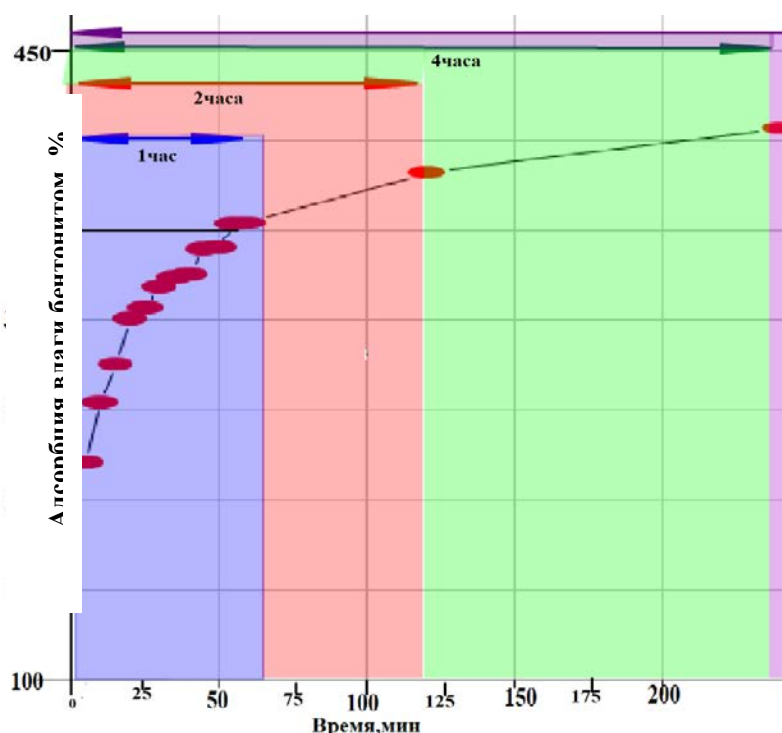


Рисунок 1 – Изменение водопоглощения бентонита с течением времени.

Это позволяет существенно повысить прочностные характеристики и получить высококачественные окатыши на важном этапе технологического цикла.

Литература:

1. М. С. Мерабишвили «Бентонитовые глины» Кавказский Научно-Исследовательский Институт Минерального Сырья (КИМС) Министерства Геологии и Охраны Недр СССР – 129 с.
2. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Тимофеев Е.С. «Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья»: учебное пособие / А.С. Тимофеева, Т.В., Никитченко, Е.С.Тимофеев – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 304 с.
3. Саиди А., Шаманян М., Барати М., Азари К. (2004). Гиперактивация бентонита в процессе гранулирования. Международный журнал иранского общества черной металлургии, 7 (1), 38-41.
4. Rosario, J. A., Silva, L. A., Moura, G. B. G., Gusatti, M., Lima, R. B., Brys, M. E., ... & Riella, H. G. (2010). Влияние щелочной активации на набухание и катионообменную способность бентонитов. В журнале Materials Science Forum (том 660, стр. 1064-1069). Trans Tech Publications Ltd.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАЧАЛА САМОРАЗОГРЕВА МЕТАЛЛИЗОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ

Шевцова Л.А., Тимофеева А.С., Гладкая Е.А.

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова» (филиал)
НИТУ «МИСИС»

Металлизированное сырье занимает особое место в структуре шихтовых материалов современной электрометаллургии. Однако высокая удельная поверхность, развитая пористость и присутствие в материале металлического железа с содержанием, достигающим 85–95 %, обуславливают его крайне низкую химическую стойкость при контакте с атмосферной и влагой [1-2]. Накопление влаги в объеме насыпного материала способствует безвозвратной потере потребительских свойств, так и возможность возникновения аварийных ситуаций при транспортировке и хранении. Физическую основу саморазогрева металлизированной продукции составляет процесс вторичного окисления, скорость которого увеличивается в присутствии влаги [3-4]. Особого внимания заслуживает аспект агрессивности увлажняющей среды: морская вода, содержащая хлорид-ионы, провоцирует значительно более интенсивный разогрев по сравнению с пресной или дистиллированной водой [5-7].

Цель работы - определения допустимого влагопоглощения с точки зрения начала саморазогрева металлизированной продукции.

Экспериментальные исследования процесса самонагревания металлизированной продукции, инициированного воздействием жидкого увлажняющего агента, были реализованы на специализированном лабораторном стенде, спроектированном на базе двухкамерного термостата. В качестве инициатора увлажнения в рамках описываемого эксперимента использовалась дистиллированная вода и 4 - % ным раствором NaCl. Выбор дистиллированной воды в качестве базового агента был продиктован методической необходимостью исключить влияние ионных примесей (в первую очередь хлоридов). Это позволило получить эталонные кинетические кривые, относительно которых в последующих сериях может быть количественно оценен каталитический эффект агрессивных сред, таких как морская вода.

Аппаратурное оформление стенда включало двухкамерный термостат, в состав которого были интегрированы высокоточный многоканальный регулятор температуры и комплекс средств непрерывного контроля параметров газовой фазы. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Первую серию экспериментов посвятили изучению динамики саморазогрева при варьировании степени увлажнения материала, сохраняя постоянными массу загрузки. Непосредственно процедура загрузки образцов в камеру №1 выполнялась следующим образом: брикеты, предварительно обработанные дистиллированной водой в заданном количестве согласно

протоколу увлажнения, помещали в реакционный сосуд с соблюдением мер, исключающих дополнительное механическое истирание и насыщение материала лабораторной атмосферной влагой. Сразу после размещения образцов крышки камер подвергали герметизации с использованием термостойкого силиконового герметика.

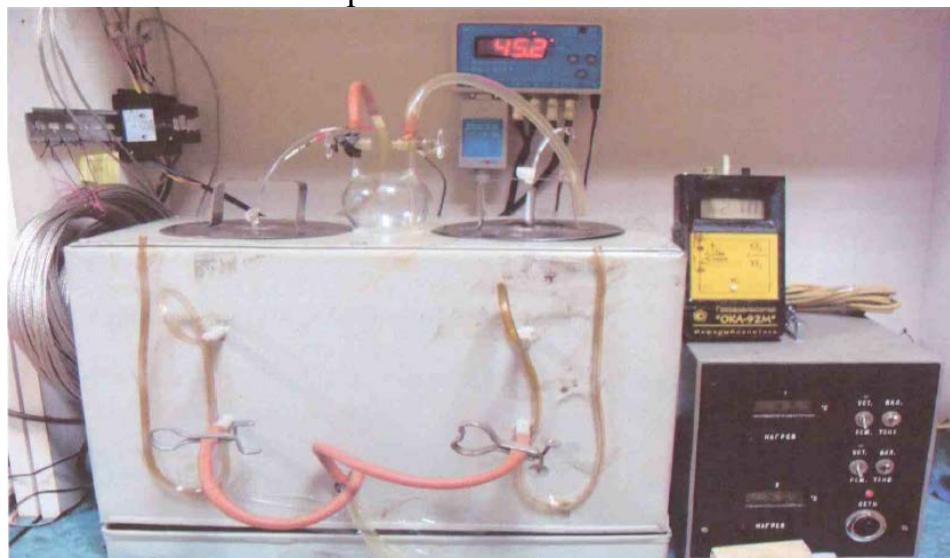


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

Влияние степени увлажнения дистиллированной водой и 4 % -ным раствором NaCl на измеряемые параметры представлено в табл. 1 и 2.

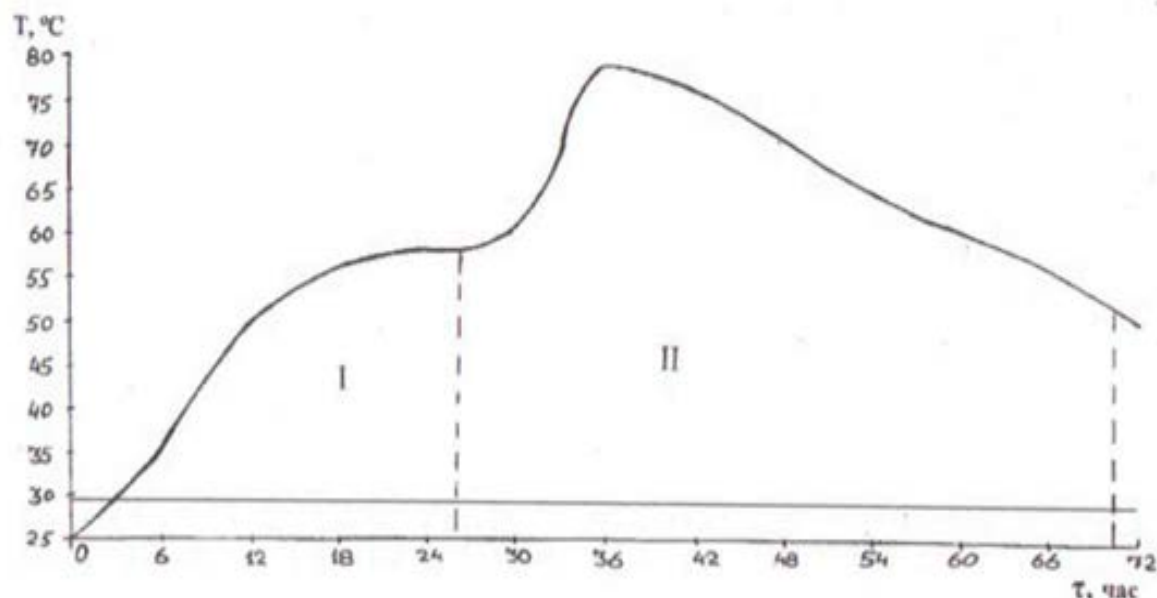
Таблица 1 – Влияние степени увлажнения дистиллированной водой на измеряемые параметры

W, %	m ₁ , г средняя	Среднее значение измеряемых параметров					
		Газовый состав в опыте, %					
		Температура		При ΔT _{max}		В конце опыта	
		T _в , °C	ΔT, °C	[O ₂]	[H ₂]	[H ₂]	[O ₂]
Два брикета высшего сорта							
3,2-3,5	1270	46	16	17,4	0,51	0,4	18,2
2	1282	41	11	17,9	0,47	0,31	18,9
1	1280	37	7	18,2	0,24	0,19	19,2
0,5	1244	33	3	19	0,09	0,07	19,8
ГБЖ класса крупности меньше 25 и выше 4 мм							
5,2-5,3	995	47	17	14	0,92	0,83	16
3	1020	54	24	13.1	0,96	0,84	15,3
1	990	42	12	14.5	0,61	0,42	16,4
0,5	1010	36	6	15	0,23	0,11	17,1
Мелочь ГБЖ							
7,3-9	956	44	14	15,7	0,93	0,77	18,1
5	960	43	13	15,1	0,89	0,7	18,3
2	950	41	11	16,8	0,75	0,59	18,9
1	948	38	8	17,3	0,43	0,31	19,2
0,5	961	35	5	18,1	0,19	0,15	19,5

Таблица 2 – Влияние степени увлажнения 4 - % ным раствором NaCl дистиллированной водой на измеряемые параметры

W, %	m ₁ , г средняя	Среднее значение измеряемых параметров					
		Газовый состав в опыте, %					
		Температура		При ΔT _{max}		В конце опыта	
		T _в , °C	ΔT, °C	[O ₂]	[H ₂]	[H ₂]	[O ₂]
Два брикета высшего сорта							
3,2-3,5	1290	50	20	16	1,01	0,73	18,5
2	1261	46	16	16,5	0,95	0,41	18,7
1	1284	55	25	17,5	0,31	0,17	19,2
0,5	1254	40	10	17,5	0,31	0,17	19,2
ГБЖ класса крупности меньше 25 и выше 4 мм							
5,2-5,3	1000	62	32	12,7	1,27	1	17,6
3	997	66	36	10,6	1,38	1,06	17
1	1010	52	22	13,3	1,12	0,92	16,8
0,5	1005	45	15	16,2	0,85	0,75	17,5
Мелочь ГБЖ							
7,3-9	955	47	17	14,3	1,55	1,15	15,5
5	950	49	19	10,5	1,75	1,2	11,5
2	948	44	14	13,2	1,59	1,01	14,2
1	960	41	11	16,1	1,02	0,73	17
0,5	952	38	8	17,2	0,81	0,51	18,2

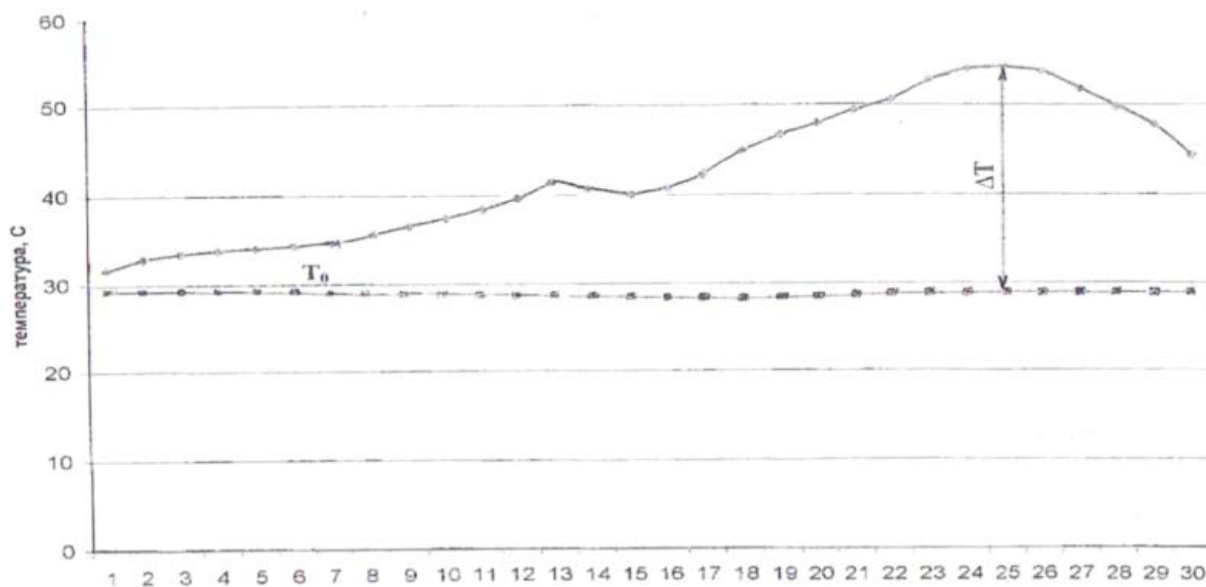
Примечание: значение ([O₂]) для свободного от навески объема сосуда, без скобок для [O₂] пробы газа прокаченной через слой навески.



I - Первая стадия разогрева $\Delta T_{\max} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;

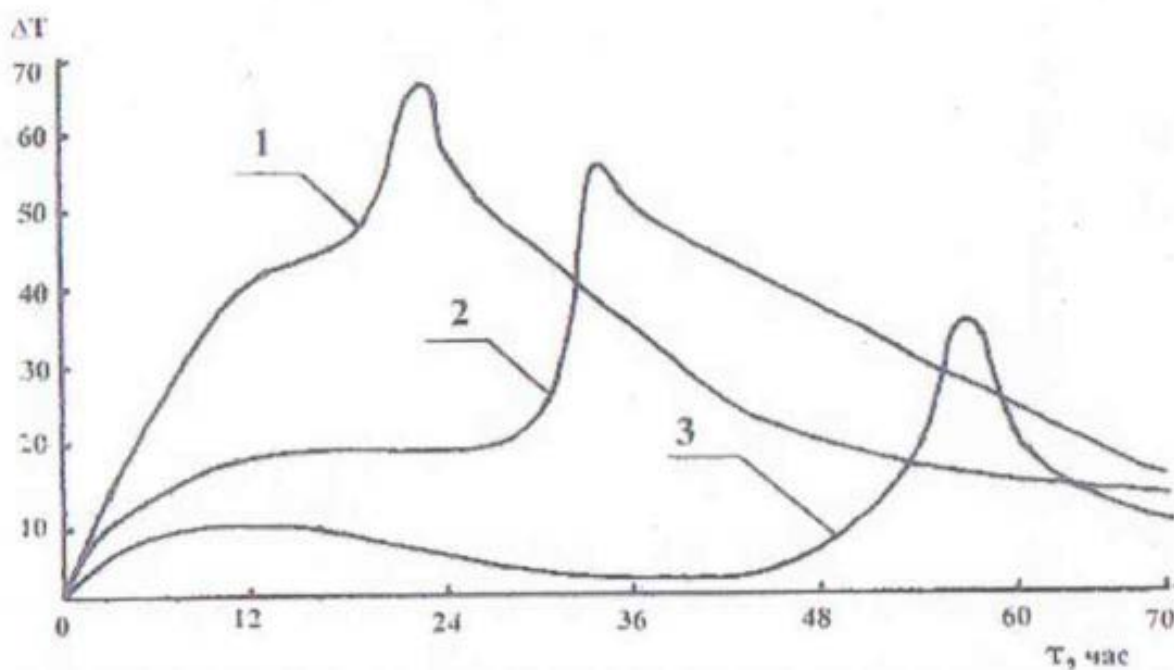
II – вторая стадия разогрева $\Delta T_{\max} = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 2 – Термограмма разогрева при полном увлажнении ГБЖ класса крупности 25-4 мм соленой водой в период обработки методики для двух камерного термостата



$$\Delta T_1 = 11^\circ\text{C}; \text{I } \Delta T_2 = 25^\circ\text{C}$$

Рисунок 3 – Термограмма разогрева брикета при увлажнении испытуемой пробы соленой водой



1- степень увлажнения 5 %; 2 - степень увлажнения 2 %;
3 - степень увлажнения 1 %;

Рисунок 4 – Иллюстрация величины разогрева мелочи ГБЖ в зависимости от степени увлажнения материала 4 % - ным раствором NaCl

Комплексная обработка результатов позволила сформировать графический материал (рис. 2-4), иллюстрирующий развитие процессов самонагрева ГБЖ инициированных влагой (пресной и соленой). Этот графический материал дает наглядное основание говорить о двух ступенчатом развитии процесса самонагрева ГБЖ независимо от вида и его степени увлажнения. При этом,

чем выше степень увлажнения, например, для мелочи ГБЖ, тем больше величина разогрева и тем быстрее достигается его максимум (рис. 4).

Получены следующие значения максимальных разогревов при увлажнении:

- горячебрикетированного железа (брикеты железной руды) высшего сорта влажностью 3,2 - 3,6 % — $\Delta T = 16$ градусов. Следовательно, при увлажнении брикетов, сформированных в штабель допустимых размеров, пресной водой величина разогрева не должна превысить 20°C , даже при максимально возможном увлажнении верхнего слоя штабеля. При этом во всех 20 опытах концентрация водорода не превышала значения 0,5 % об.

- горячебрикетированное железо (брикеты железной руды) класса крупности менее 25 свыше 4 мм - влажностью 3,0 % — $\Delta T = 24$ градуса;

- мелочь горячебрикетированного железа (брикетов железной руды) влажностью 7-9 % — $\Delta T = 14$ градусов.

Литература:

1 Снопков В.И. Технология перевозки грузов морем: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп.-С.Петербург: АНО НПО “Мир и Семья”, 2001 г.- 560с .илл.

2 International Maritime Solid Bulk Cargoes Code (IMSBC Code) and supplement.-London: International Maritime Organization, 2009-445p.

3 Правила Безопасности Морской Перевозки Навалочных грузов (Правила НГ), СТО 318.1.38-2009. Книга 1,2 – СПб., ЦНИИМФ, 2009.-842 с.

4 Андрияшин В.И., Волнухин В.А., Касторных Л.А. Вторичное окисление металлизированных окатышей в экстремальных условиях // Прямое получение железа и порошковая металлургия, вып. 3. - М. 1978, С. 22-27.

5 Процессы вторичного окисления железа. Учебное пособие по выполнению лабораторных работ/ Тимофеева А.С., Никитченко Т.В. - Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСИС», 2013-5 4с.

6 Пути защиты губчатого железа от вторичного окисления / Завидонская А.В., Монахова В.С., Горина И.М. и др. // БНТИ Черная металлургия, 1979, № 4. С.21-40.

7 Шубин А.Ф. Исследование процессов металлизации железорудных материалов в шахтных печах. Автореф. диссертации канд. тех. наук.-Магнитогорск, 1981, 22с.

8 ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (с Изменением N 1) [Электронный ресурс].URL: <https://digest.wizardsoft.ru/wp-content/uploads/media/doc/2018/gost/gost12-1-044-89.pdf> (дата обращения: 06.04.2026)

ДИНАМИКА ОКИСЛЕНИЯ ГОРЯЧЕБРИКЕТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА И ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Гладкая Е.А., Шевцова Л.А., Тимофеева А.С.

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
НИТУ «МИСИС»

Потребителями горячебрикетированного железа являются металлургические заводы разных стран. Следствием этого возникает необходимость транспортировки больших количеств ГБЖ на дальние расстояния, в том числе и морским путем. Довольно большие количества металлизированного продукта должны будут храниться в течение определенного времени на металлургических предприятиях в виде нормированных запасов шихты.

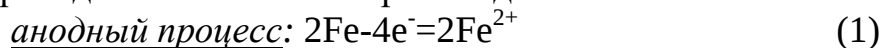
При длительном хранении и транспортировке горячебрикетированное железо несмотря на то, что оно обладает низкой открытой пористостью (4-5%), склонно к окислению. При этом происходит снижение степени его металлизации, а при хранении в закрытых помещениях и транспортировке это может привести к созданию взрывоопасных ситуаций и нарушению требований безопасности.

При транспортировке по морю или по реке и при хранении в порту ГБЖ подвергается атмосферной коррозии. Атмосферная коррозия протекает на поверхности металла, покрытого тонкой пленкой влаги. Поэтому важнейшее значение имеет степень и длительность увлажнения брикетов.

На них могут образовываться фазовые (видимые) или адсорбционные пленки влаги. Фазовые пленки образуются при влажности около 100 % (дождь, другие осадки). Адсорбционные пленки образуются при влажности выше критической (60-70 %), т.е. когда скорость атмосферной коррозии быстро увеличивается.

Атмосферная коррозия протекает почти всегда с кислородной деполяризацией. На рис. 1 представлена схема электролитического окисления в воде [1].

В процессе электролитического окисления прямовосстановленного железа с анода на катод переходят ионы железа. Происходит окисление металла:



Вода состоит из положительно заряженных ионов водорода 2H^+ и отрицательно заряженных ионов кислорода O^- .

Освободившиеся электроны переходят с анодных участков к поверхности катода. В реальных условиях коррозии встречается два вида катодной деполяризации: кислородная и водородная. Кислородная деполяризация протекает в нейтральной и щелочной средах:



Водородная деполяризация встречается в кислой среде, а также в нейтральной или (редко) в щелочной среде при отсутствии кислорода.

Электроны на катодной поверхности соединяются с имеющимися в растворе ионами водорода, выделяя газообразный водород [2].

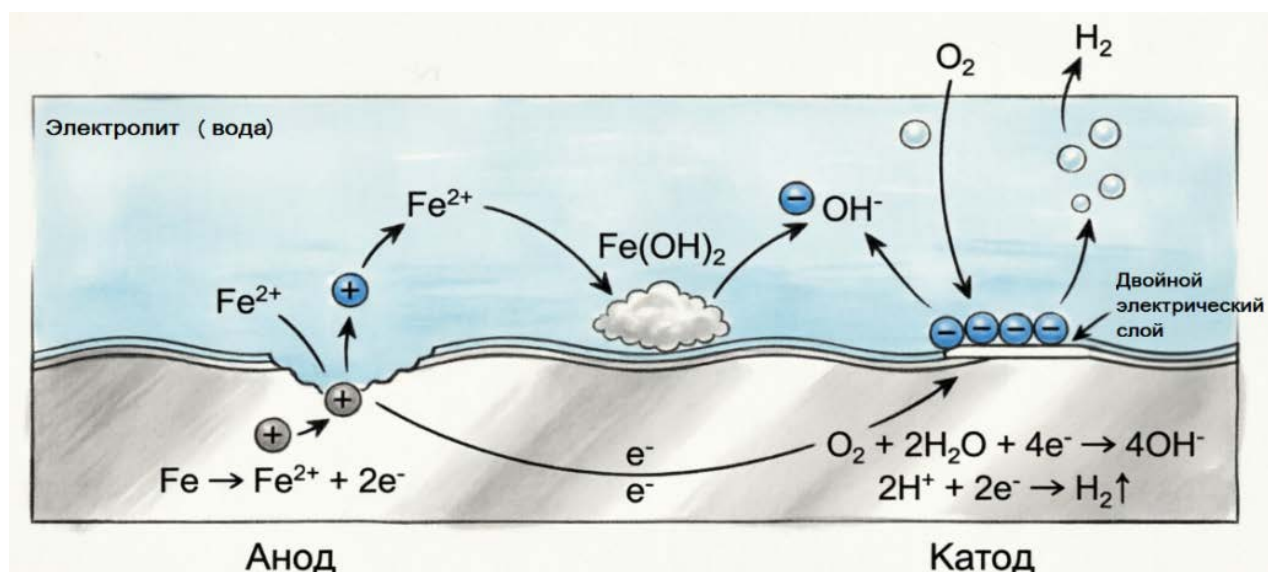


Рисунок 1 – Электролитическое окисление железа в морской воде

Результаты проведенных исследований [3, 4] позволяют утверждать, что металлизированное сырье, полученное при высокотемпературных процессах, при хранении и транспортировке в отсутствии влаги, практически, не должно окисляться. Транспортировка на небольшие расстояния в условиях влажной атмосферы при недлительном хранении также не сопряжена с опасностью значительного вторичного окисления. Однако проведение погрузочно-разгрузочных работ в дождливую погоду с последующей длительной транспортировкой или хранением губчатого железа сопряжено с опасностью значительного развития процессов вторичного окисления с разогревом его штабелей и нарушением обстановки окружающей среды [5].

Авторы работ [6; 7; 8] показали, что чем больше открытая пористость и температура воды, тем больше реакционная способность брикетов и больше выделяется водорода при окислении горячебрикетированного железа, так как в окислении участвует поверхность большего количества пор. Если же брикеты претерпевают разрушение, пусть даже и незначительное, их пористость будет увеличиваться значительно, с учетом более слабой деформации внутренних окатышей в брикете, соответственно при наличии влаги будет увеличиваться реакционная способность и выделение водорода.

Для определения потери степени металлизации во время хранения брикетов на открытом воздухе или при транспортировке сначала необходимо экспериментально определить объем кислорода, поглощаемый определенной массой ГБЖ за определенный промежуток времени.

Зная химический состав железа прямого восстановления, можно рассчитать массу кислорода, которую может присоединить количество $\alpha\text{-Fe}$ в 1 т ГБЖ, при условии неизменной скорости окисления [9].

Скорость реакции вторичного окисления можно рассчитать по формуле:

$$\vartheta = \frac{d\alpha}{d\tau}, \quad 1)$$

где α – степень превращения вещества во времени, % ед. времени.

$$\alpha = \frac{Fe_0 - Fe}{Fe_0} \cdot 100, \quad 2)$$

где

Fe_0 – исходное количество вещества (чистого железа), ед. массы;

Fe – текущее количество вещества, ед. массы.

Расчет электрохимического окисления с кислородной деполяризацией по реакции (3) проходит при условии полного окисления, сначала для каждого брикета, имеющего разную пористость, а затем для 1 т ГБЖ.



Последовательность расчета определения скорости окисления брикетов от температуры:

- 1) Рассчитать молярную массу каждого реагента;
- 2) Рассчитать количество молей каждого реагента;
- 3) Рассчитать стехиометрическое отношение реагентов;
- 4) Определить количество молей продукта, полученного из 1 моля лимитирующего реагента;
- 5) Найденное количество молей умножается на заданное количество молей ограничивающего реагента;
- 6) Для нахождения массы продукта необходимо умножить количество молей на молярную массу.

По данной реакции лимитирующим реагентом является кислород. Теоретический выход по реакции (3) равен 0,047 г $Fe(OH)_2$. Все расчеты были сделаны в программе MS Excel. На основе полученных данных были построены графики зависимости скорости окисления (рис. 2) и изменения степени металлизации (рис. 3) от температуры. Как показано на рис. 2, повышение температуры приводит к ускорению окисления за счёт роста реакционной способности брикетов. Брикет № 4 окисляется быстрее остальных вследствие наибольшей пористости и высокого водопоглощения.

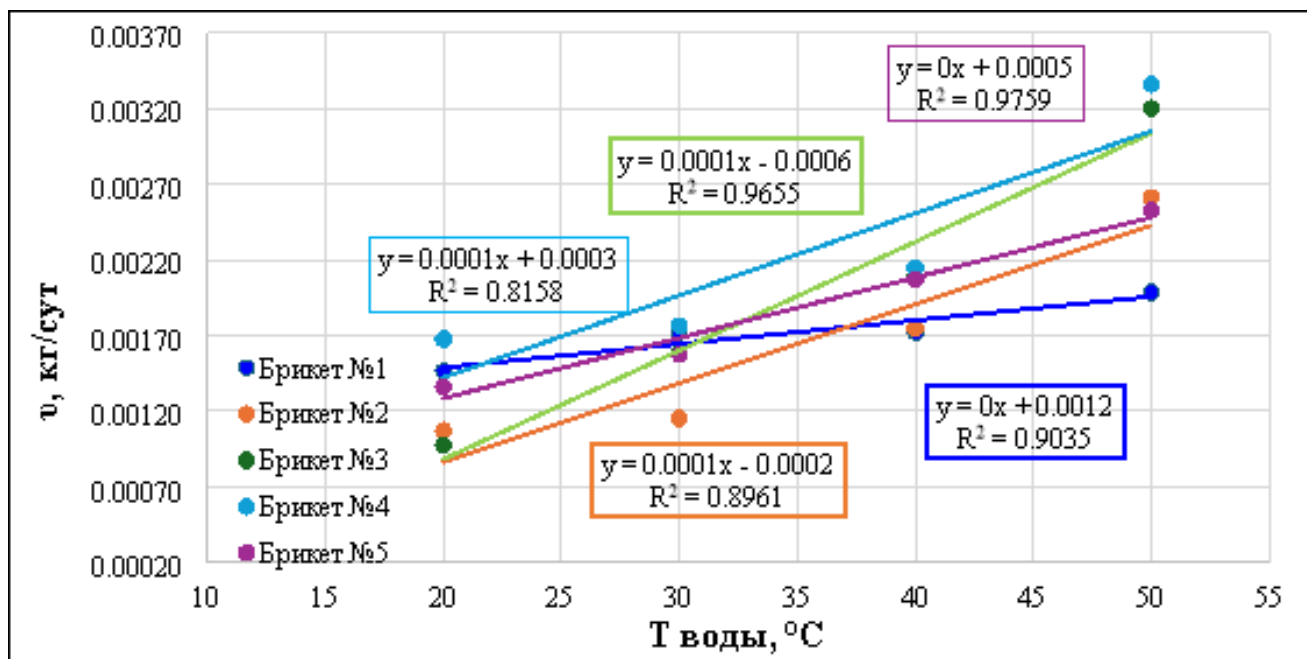


Рисунок 2 – Зависимость скорости окисления от температуры

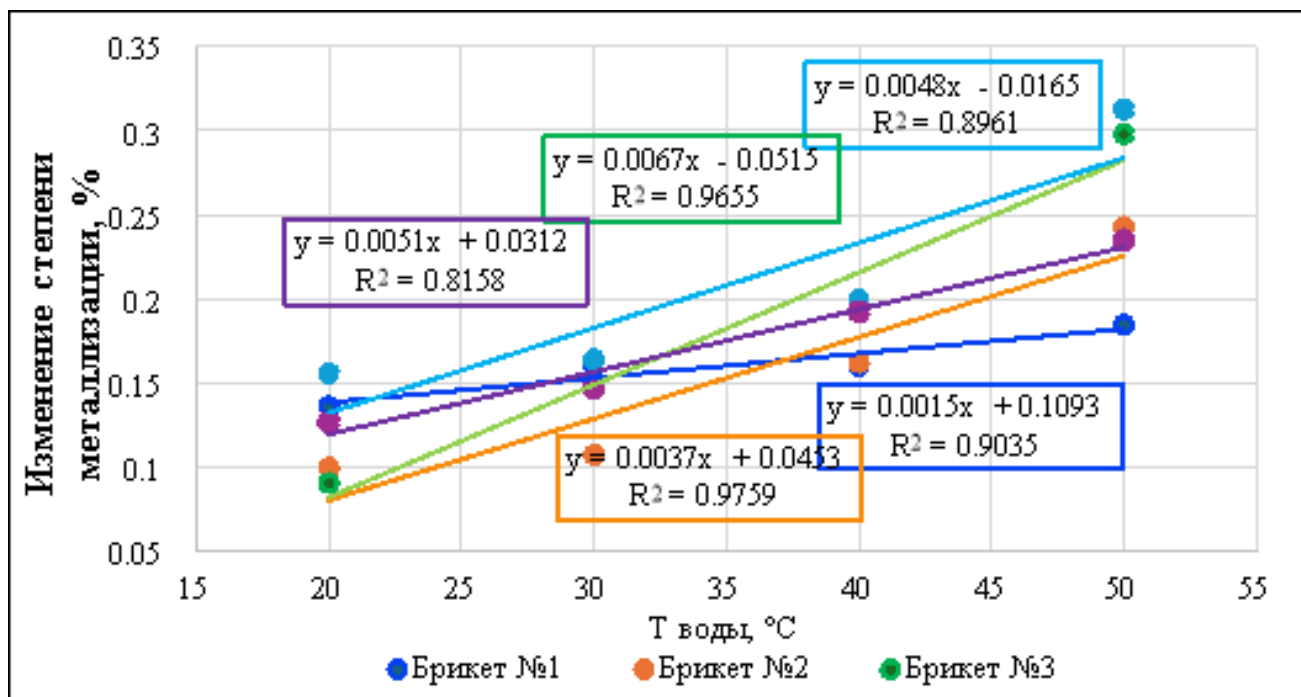


Рисунок 3 – Зависимость изменения степени металлизации от температуры

На рис. 3 видно, что изменение степени металлизации увеличивается с увеличением температуры воды. Это говорит о том, что вторичное окисление влияет на качество и химический состав горячебрикетированного железа.

В результате проведенного расчета выявлено, что степень металлизации за 1 сутки в процессе электролитического окисления 1 тонны горячебрикетированного железа с кислородной деполяризацией снижается в среднем более чем на 2 % и с ростом температуры ее изменение увеличивается.

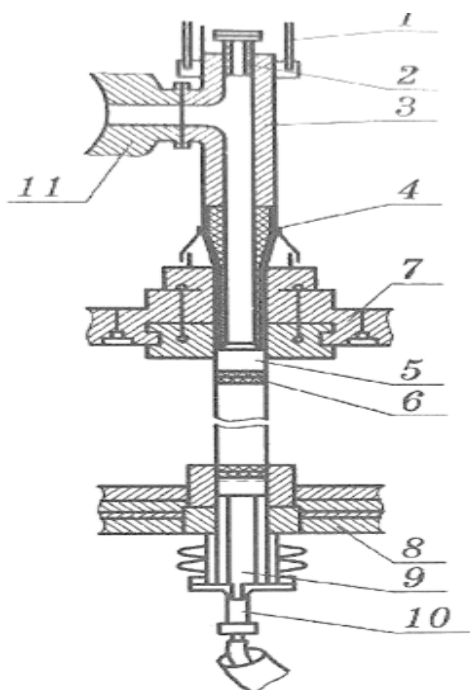
Литература:

1. Авдеев А.П., Поляков А.Е. Коррозия и защита металлов: Краткий курс лекций. – Краматорск: ДГМА, 2003. – 104 с.
2. Васильев, В. В. Коррозия металлов: Методические указания для самостоятельной работы студентов всех специальностей / В.В. Васильев, А. В. Кольчугин. —Иваново, 2006. – 23 с.
3. Дэм О. Технический отчет о реактивности, безопасной погрузке, разгрузке и перевозке продуктов железа прямого восстановления // 4-я ежегодная конференция по рынку перевозок сухих навалочных грузов. АП ГБЖ (НВIA), Лондон, 9 и 10 мая 2007 г.
4. Розовский, А. Я. Кинетика топохимических реакций / А. Я. Розовский. —Москва: Изд-во «Химия», 1974. – 224 с.
5. Тимофеева, А. С., Никитченко, Т. В. Процессы вторичного окисления железа: учебное пособие / А. С. Тимофеева [и др.]. — Старый Оскол: 2019. — 116 с.
6. Влияние пористости ГБЖ на реакционную способность и выделение водорода при электролитическом окислении / Е. А. Гладкая, А. Б. Арутюнян, С. К. Бакиров, В. А. Дурнева // Студент года 2022: сборник статей XX Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 05 февраля 2022 года. – 165 с.
7. Никитченко, Т. В. Исследование и разработка технологии производства горячебрикетированного железа из концентратов КМА на промышленной установке металлизации НУЛ-III: дис. на соиск.учен. степ. канд. техн. наук: 24.06.04 / Никитченко Татьяна Владимировна. - Липецк, 2007. – 167 с.
8. Перелыгин, Ю. П. Коррозия и защита металлов от коррозии: учеб. пособие для студентов технических специальностей / Ю. П. Перелыгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. – 88 с
9. Исследование скорости вторичного окисления горячебрикетированного железа с целью прогнозирования длительности сохранения его металлургической ценности / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, А. А. Кожухов, Н. И. Мазур // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации, 2019 – Т. 75, № 3. – С. 322-327.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕФОРМЕРА MIDREX ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА РЕАКЦИОННЫХ ТРУБ

Ермоленко К.А., Шевцова Л.А., Лихтина Е.Ю., Тимофеева А.С.
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
НИТУ «МИСИС»

Одним из основных агрегатов в процессе прямого восстановления железа является реформер. В нем протекают реакции конверсии природного газа для получения восстановительного газа, который необходим для процесса металлизации в шахтной печи. Данные реакции происходят в реакционных трубах (рис. 1), заполненных никелевым катализатором [1, с.33]. Для того чтобы данные реакции происходили в направлении продуктов реакции, т.е. образования восстановителей CO и H_2 необходим подвод значительного количества тепла (для смещения равновесия температура должна быть выше $750^{\circ}C$). Для этого в реформере установлены ряды основных и вспомогательных горелок.



- 1-подвеска трубы; 2-фланец с запорной пробкой; 3-тройник;
4-изолирующая вставка; 5-реакционная труба; 6-катализатор;
7-свод реформера; 8-днище реформера; 9-подставка под катализатор;
10-труба питающего газа; 11-коллектор реформированного газа

Рисунок 1 – Реакционная труба в разрезе

Из-за длительного воздействия высоких температур (особенно на своде она достигает $1150^{\circ}C$ и более) и агрессивной окислительной среды, реакционные трубы могут выйти из строя или по-простому прогореть. Наиболее сильно

данному дефекту подвержена верхняя часть реакционных труб, т.к. там наиболее высокие температуры, а также эта часть реакционных труб зачастую остается без катализатора по причине удлинения (изнутри нет теплосъема).

На рис. 2 показано как выглядит выход реакционной трубы реформера Мидрекс через смотровое отверстие.

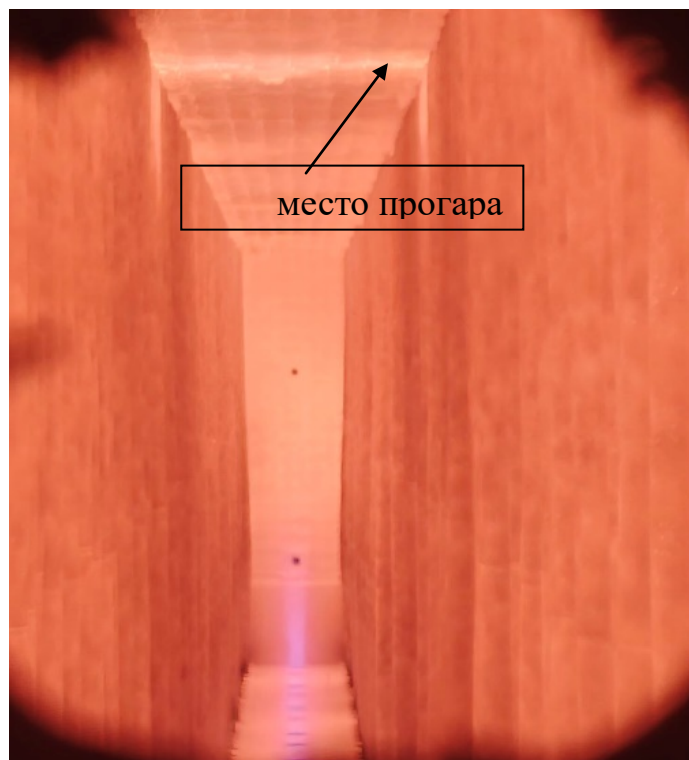


Рисунок 2 – Типовое место разрушения в зоне максимальных термических нагрузок

Видно свечение в верхней части реакционной трубы, горячий реформированный газ выбрасывается в топочное пространство реформера, разогревает свод, что в свою очередь может привести к прогоранию слоя футеровки и корпуса реформера.

На рис. 3 показана технологическая цепочка производства горячебрикетированного железа (ГБЖ) [2, с.117].

Она состоит из системы загрузки шахтной, системы шахтной печи, системы газоснабжения шахтной печи, системы реформера, системы рекуперации тепла, системы разгрузки шахтной печи, системы горячего брикетирования, системы оборотных циклов воды, системы управления установкой

Реакционные трубы изготавливают центробежным литьем, сырьем являются никель и хром. В нижней части трубы содержится до 36% Ni и до 26% Cr, в верхней части – до 50% Ni и до 29% Cr [1, с.33].

В АО «Лебединский ГОК» эксплуатируются реакционные трубы Schmidt – Clemens выполненные из следующих сплавов G 4852 MICRO, G 4879 MICRO, 60 HTD. До этого в эксплуатации были реакционные трубы фирмы МИДРЕКС,

[illegible]

В табл. 1 и 2 показаны свойства стальных сплавов в зависимости от процентного содержания основных легирующих элементов (в частности Cr и Ni) для производства реакционных труб [3].

Класс стали	Диапазон концентраций	Основная задача	Ключевые эффекты
Низколегированные стали	0,3–1,0% Cr	Повышение коррозионной стойкости и закаливаемости	Повышенная прочность, умеренная коррозионная стойкость
Конструкционные	0,5–2,0% Cr	Общая коррозионная стойкость	Улучшенная пластичность, окислительная стойкость
Нержавеющие (ферритные) стали	10,5–30% Cr	Коррозионная стойкость, магнитные свойства	Отличная коррозионная стойкость

Аустенитные нержавеющие стали	16–20% Cr	Коррозионная стойкость, пластичность	Высокая коррозионная стойкость
-------------------------------------	-----------	--	--------------------------------------

Таблица 2 – Свойства стали в зависимости от содержания Ni

Класс стали	Диапазон концентраций	Основная задача	Ключевые эффекты
Аустенитные нержавеющие стали	8–12% Ni	Коррозионная стойкость	Повышенная коррозионостойкость
Мартенситные нержавеющие стали	0,2-1,0% Ni	Закаляемость	Умеренная коррозионная стойкость
Высокопрочные низколегированные стали	0,2-0,5% Ni	Прочность	Микроструктурная стабилизация
Коррозионностойкие жаропрочные стали	18–50% Ni	Жаропрочность, коррозионная стойкость	Жаропрочность и износостойкость

Можно заметить, что с увеличением концентрации Cr и Ni в сплаве, он обретает необходимые свойства для изготовления реакционных труб, таких как жаропрочность, коррозионностойкость и достаточная пластичность. Кроме того, в зависимости от определенной части реакционной трубы, сплав может содержать до 3% Mo, до 6% W, 4,5% Al, 1,5% Nb.

Т.к. в настоящее время нет возможности приобрести зарекомендовавшие себя трубы фирмы Schmidt – Clemens, был найден альтернативный производитель. Таким производителем является компания ЦИНДАО ЭНПИЭЙ (Китай). Компания производит реакционные трубы методом центробежного литья, сварка производится на автоматической установке в инертной аргонной среде. Сплавы, которые использует компания представлены в табл. 3.

Продукцию данного производителя используют такие компании как Stone & Webster (змеевики рекуператора), ExxonMobil (теплообменники печи крекинга), Sela Linde (змеевики нагревателя HYL), IRIKA MAKRAK Steel Complex (реакционные трубы реформера).

Компания заявляет то, что трубы их производства не будут уступать европейским и заявляют срок службы 100 000 часов или не менее 10 лет, а диапазон рабочих температур составляет 1000–1200 °С, что соответствует тепловому режиму реформера МИДРЕКС.

Таблица 3 – Сплавы для производства реакционных труб, которые использует компания ЦИНДАО ЭНПИЭЙ

	NH25-35MIC	NH28-48-5W	NH1949
Cr	24–27%	26–30%	25–29%
Ni	33–36%	46–50%	43–47%
Nb	0,5–1,5%	0,5–1,5%	/
W	≤0,6%	4–6%	4–6%
Si	0,5–1,5%	≤2%	/
C	0,4–0,5%	0,4–0,6%	0,4–0,55%
Mn	≤1,5%	≤1,5%	/
S	≤0,03%	≤0,03%	≤0,03%
P	≤0,03%	≤0,03%	≤0,03%
Mo	≤0,5%	≤0,5%	≤0,5%
Al	≤0,05%	≤0,05%	3–4,5%

Установка качественных труб — это залог: стабильной работы реформера, высокой производительности установки, высокого качества реформированного газа, минимизации потерь, связанных с выходом из строя реакционных труб реформера, экологической безопасности процесса. Замкнутый цикл, невозможность выбросов горючих и отравляющих веществ.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Установлены корневые причины разрушения реакционных труб.
2. Подтверждена безальтернативность Ni-Cr основы.
3. Выявлен перспективный альтернативный поставщик.

Литература:

1. Тимофеева, А. С. Физико-химические основы реформинга газов: учебное пособие / А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко, Е.С. Тимофеев, В.В. Федина. - Старый Оскол: "ТНТ", 2019. - 156 с.

2. Тимофеева, А. С. Теплофизические особенности производства окисленных окатышей и металлизированного продукта: учебное пособие / А.С. Тимофеева, Е.С. Тимофеев. - Старый Оскол: "ТНТ", 2015. - 204 с.

3. Влияние легирующих элементов на конечные свойства стальных сплавов [Электронный ресурс] URL: <https://metalzenith.com/ru/blogs/chemical-elements-compounds-terms/nickel-ni-key-alloying-element-enhancing-steel-durability-and-corrosion-resistance> (дата обращения: 03.04.2026).

СОЗДАНИЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛИТЫХ ЧУГУНОВ

Назарюк В.Ю., Симоненко В.И.

Донецкий национальный технический университет

Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения эксплуатационного ресурса деталей (колес и крыльчаток) шламовых насосов, которые подвергаются интенсивному абразивному воздействию в процессе откачки шахтных вод и шлама [1]. Высокая интенсивность износа рабочих элементов приводит к их преждевременному выходу из строя, что негативно сказывается на экономических показателях предприятий горнодобывающей отрасли [2]. До 90 % случаев выхода из строя горного оборудования связаны с процессами изнашивания, возникающими в условиях контактного взаимодействия с абразивной средой [3].

Для изготовления износостойких деталей традиционно применяются высокохромистые белые чугуны, обладающие высокой твердостью, однако выбор материала часто осложняется отсутствием достоверных методов расчета на износостойкость при проектировании [3]. Продление срока службы оборудования требует не только экспериментального изучения существующих сплавов, но и построения точных математических моделей, способных прогнозировать износостойкость на основе химического состава [4].

Целью работы является комплексное изучение абразивной износостойкости различных марок легированных чугунов и построение уточненной прогностической модели износа с использованием современных методов ансамблевого моделирования.

В качестве объектов исследования выступали образцы легированных чугунов марок ИЧХ28, ЧХ3, ИЧХ13 и Г300. Данные образцы были вырезаны из литников заготовок литейного производства и полностью соответствовали по структуре и химическому составу реальным промышленным отливкам крыльчаток шламовых насосов. Для проведения испытаний заготовки приводились к единому размеру, а их рабочая поверхность подвергалась шлифовке [1].

Испытания на абразивный износ проводились согласно ГОСТ 30480-97 [5] по схеме трения образца о незакрепленный абразив, находящийся на твердой поверхности [4]. Абразивным материалом служил кварцит с фракцией менее 1 мм, удельная нагрузка на образец составляла 1,25 кг/см² [1].

Абсолютная потеря массы ($\Delta P_{\text{абс}}$) пересчитывалась в удельную потерю массы ($\Delta P_{\text{уд}}$) по формуле:

$$\Delta P_{\text{уд}} = \frac{\Delta P_{\text{абс}}}{S \cdot L} \quad (1)$$

где L - путь износа, S - площадь поверхности износа образца.

Для оценки сравнительной эффективности материалов рассчитывался коэффициент относительной износостойкости (K_n) по отношению к эталонным образцам Ст20 [4]:

$$K_n = \frac{\Delta R_{удСт20}}{\Delta R_{уд n}} \quad (2)$$

где $\Delta R_{удСт20}$ - удельная потеря массы образца Ст20 = 2,119.

Химический анализ всех исследуемых образцов проводился на установке спектрального анализа «Искролайн-100», что позволило обеспечить высокую точность данных для последующего математического анализа [4]. В отличие от предыдущих работ [4], где использовалась простая линейная регрессия, в данном исследовании применен метод ансамблевого моделирования, объединяющий алгоритмы OLS, Ridge, Lasso и ElasticNet.

Применение ансамблевого моделирования с весовой оптимизацией по $1/RMSE$ позволило получить более устойчивую прогностическую модель с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,72$ на отложенной тестовой выборке. Это свидетельствует о приемлемом уровне обобщающей способности без явно выраженного переобучения.

Итоговое уравнение ансамблевой модели для определения удельного износа (y) имеет вид:

$$y = 0.2616 + 0.1646 \cdot C + 0.0200 \cdot Cr - 1.4055 \cdot Mn - 1.4990 \cdot Ni - 17.8888 \cdot Ti + 7.5163 \cdot Si - 41.5126 \cdot V + 0.6607 \cdot Mo \quad (3)$$

где элементы (C, Cr, Mn, Ni, Ti, Si, V, Mo) указаны в массовых долях в процентах.

Знак коэффициента отражает направление влияния: положительный означает рост удельного износа, отрицательный — его снижение (рост износостойкости).

Сводные результаты проведенных испытаний представлены в табл. 1.

Анализ влияния легирующих элементов:

Доминирующие факторы: титан и ванадий, для которых коэффициенты в уравнении (3) имеют наибольшие абсолютные отрицательные значения, обеспечивают наибольшее снижение удельного износа. Увеличение содержания Ti и V в исследуемом диапазоне приводит к заметному снижению y , т.е. к повышению износостойкости. Это согласуется с известными концепциями: ванадий способствует образованию мелкодисперсных специальных карбидов, которые упрочняют матрицу, а титан образует твердые включения TiC, которые действуют как барьер для абразивного микрорезания [2, 6].

Таблица 1 – Результаты теста изучаемых образцов на абразивный износ [1, 4]

Номер, n	Начальная масса	Конечная масса	Разница массы	S, мм ²	$\Delta P_{уд}$	Относит. индекс к Ст20	Относит. индекс к Ст20 (прогноз)
575	71,500	71,405	0.095	0.00051	0,62557	6.4	4.54
575.1	70,334	70,149	0.185	0.00051	0,58457	3.29	4.54
575.2	70,149	69,996	0.153	0.00051	0,52155	3.97	4.54
564	60,205	60,007	0.198	0.00056	0,39667	3.39	5.22
4.4	45,210	45,028	0.182	0.00055	0,42973	3.63	3.79
567	73,876	73,734	0.142	0.00048	0,41901	4.06	4.80
567.1	73,725	73,617	0.108	0.00048	0,36897	5.34	4.80
567.2	73,617	73,500	0.117	0.00048	1,34801	4.93	4.80
563	54,172	54,048	0.124	0.00052	0,66906	5.06	4.26
562	51,950	51,850	0.1	0.00048	0,63463	5.75	4.62
563.1	54,048	53,850	0.198	0.00052	0,65682	3.17	4.26
562.1	51,850	51,678	0.172	0.00048	0,31905	3.34	4.62
564.2	59,853	59,751	0.102	0.00056	1,91478	6.58	5.22
575.3	69,956	69,837	0.119	0.00051	1,99237	5.11	4.54
ICHKh13.1	~	~	0.188	0.00044	1,31892	2.8	2.60
ICHKh13.2	~	~	0.211	0.00044	0,46806	2.5	2.60
ICHKh13.3	~	~	0.16	0.00044	0,51487	3.29	2.60
ICHKh13.4	~	~	0.328	0.00044	0,56168	1.61	2.60
G300.1	~	~	0.1	0.00038	0,62557	4.53	4.11
G300.2	~	~	0.11	0.00038	0,58457	4.12	4.11
G300.3	~	~	0.12	0.00038	0,52155	3.77	4.11

Коэффициенты для Mn и Ni также отрицательны, но их абсолютные значения меньше, чем у Ti и V, что указывает на их умеренно положительный вклад в износостойкость. Увеличение содержания марганца и никеля в пределах рассматриваемых значений приводит к снижению удельного износа за

счет стабилизации аустенитной фазы и ее упрочнения при трении [2].

Кремний характеризуется положительным коэффициентом, что означает, что его увеличение приводит к увеличению удельного износа и снижению износостойкости. Это согласуется с литературными данными: избыточное содержание Si может вызывать нежелательные структурные изменения и снижать вязкость матрицы, способствуя скалыванию материала в условиях абразивного износа. Этот вывод справедлив именно в диапазонах содержания Si, присутствующих в исследованных сплавах [7].

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 : материалы X Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (28–29 мая 2024 г.)*. — Донецк : ДОННТУ, 2024. — С. 14–15.
2. Назарюк, В. Ю. Сравнительные испытания материала отливок колес шламовых насосов на абразивный износ / В. Ю. Назарюк, В. И. Симоненко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых : материалы XI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (май 2025 г.)*. — Донецк : ДОННТУ, 2025.
3. Микроструктурный анализ и износостойкость легированных чугунов с марганцем / Н. Н. Хамроев, И. П. Эгамбердиев, Х. Х. Ашуров, Ш. Б. Буронов // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн.* — 2025. — № 6 (135). — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20264>.
4. Бахрачева, Ю. С. Новый метод прогнозирования износостойкости стали / Ю. С. Бахрачева // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность*. — 2014. — № 4 (13). — С. 74–78.
5. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. — Введ. 1999-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 2001. — 10 с.
6. Повышение износостойкости высокомарганцевой стали / М. С. Шрамко, В. П. Каргинов, А. В. Малый [и др.] // *Литейное производство*. — 2015. — № 2. — С. 100–103.
7. Богодухов, С. И. Термическая обработка износостойких чугунов / С. И. Богодухов, И. Ш. Тавтилов, Нгуен Хоанг Линь // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. — 2017. — № 6. — С. 71–77.

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПУТ

Падалка А.В., Падалка В.П., Кочура В.В.
Донецкий национальный технический университет

Эффективность доменной плавки определяется, прежде всего, расходом кокса, стоимость которого составляет от 30 до 50 % себестоимости чугуна, а также уровнем производительности печи. За последние 50 лет указанные показатели на лучших примерах мировой практики улучшились практически вдвое: $Q_k=240-300$ кг/т чугуна, $P=3-3,5$ т/(м³ сут) [1-6].

Одним из наиболее значительных мероприятий по повышению эффективности доменной плавки является использование пылеугольного топлива (ПУТ). В настоящее время с применением ПУТ выплавляется более 1 млрд. т чугуна в год.

Пылеугольная технология весьма капиталоемкое мероприятие 5-7 млн \$ на 1 млн.т выплавленного чугуна. В связи с этим минимальная эффективность пылевдувания появляется только после освоения 100-120 кг ПУТ /т чугуна [7].

Енакиевский металлургический завод (ЕМЗ) имеет благоприятные предпосылки для высокоэффективного использования ПУТ: современные доменные печи объемом 1513 и 1719 м³, аглофабрика, склад окатышей и кокса (СОК), предусматривающий подготовку основных шихтовых материалов к плавке, воздухонагреватели Калугина с температурой дутья до 1250 °С, лотковое загрузочное устройство на ДП-3 и другое. Для реализации ПУТ-технологии фирмой Kuttner построена современная ПУТ-установка, введенная в эксплуатацию в 2016 г.

Для выполнения технологических расчетов использовался метод профессора А.Н. Рамма [8]. Сущность которого заключается в определении расхода кокса по тепловым эквивалентам шихтовых материалов и дутьевым параметрам: температуре, влажности, содержанию дополнительного кислорода и расходам различных углеводородсодержащих добавок, вдуваемых в фурму доменной печи.

В качестве базового периода принята работа ДП-5 без вдувания ПУТ. В качестве компенсирующих мероприятий использованы: повышение температуры дутья до 1100 °С, содержания кислорода в дутье до 23,5%, вывод природного газа из состава дутья, снижение основности шлака (CaO/SiO_2) до 1,1 и выхода шлака.

Расчет выполнен для расходов ПУТ 60, 90, 120 и 150 кг/т чугуна в 2-х вариантах: без природного газа (табл. 1) и с природным газом (табл.2), который вдувался одновременно с ПУТ. В качестве компенсирующих мероприятий использованы: повышение температуры дутья до 1100 °С, содержания кислорода в дутье до 23,5%, вывод из состава дутья природного газа, снижение основности шлака (CaO/SiO_2) до 1,1 и выхода шлака. Для приготовления ПУТ использован Кузнецкий слабоспекающийся уголь марки СС.

Таблица 1 - Расчет эффективности вдувания ПУТ (без ПГ)

Наименование	База	Повышение температуры дутия до 1100 °С	Кислород в дутье 1 %	Понижение вязкости шлака	Вдувание ПУТ			
					60	90	120	150
Варианты	1	2	3	5	6	7	8	9
Производительность, %	100	105,9	108,6	109,7	109,1	110,0	112,1	113,9
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	564,2	523,6	525,3	521,2	452,4	419,7	388,2	357,1
Коксовый орешек, кг/т чугуна	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6
Агломерат, кг/т чугуна	634	634	634	634	634	634	634	634
Окатыши, кг т чугуна	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038
Известняк обычный, кг/т чугуна	76	72	72	54	50	48	76	76
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1552	1378	1317	1301	1276	1237	1176	1120
Температура дутья, °С	906	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
ПУТ, кг/т чугуна	0	0	0	0	60,0	90,0	120,0	150,0
Содержание кислорода в дутье, %	20,0	20,0	21,0	21,0	21,0	21,5	22,5	23,5
Выход сухого колошниковога газа, м ³ /т чугуна	2154	1947	1887	1868	1831	1788	1725	1668
Температура колошниковога газа, °С	240	218	202	202	216	215	207	200
Степень использования СО, доли	0,371	0,368	0,367	0,371	0,394	0,404	0,412	0,419
Степень прямого восстановления, доли	0,537	0,554	0,554	0,554	0,492	0,474	0,451	0,422
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1893	1681	1620	1600	1608	1586	1542	1503
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	652	579	580	573	599	614	629	644
Выход шлака, кг/т чугуна	416	409	409	398	392	390	387	385
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,5	6,1	6,1	6,1	5,6	5,4	6,5	6,5
Основность CaO/SiO ₂	1,16	1,16	1,16	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Химсостав чугуна, % [S]	0,061	0,063	0,064	0,065	0,650	0,650	0,650	0,065
Теоретическая температура горения, °С	2130	2311	2289	2289	2202	2186	2174	2155
Расход условного топлива, кг/т чугуна	601,58	560,77	562,54	564,78	555,48	552,61	550,92	549,74

Таблица 2 - Расчет эффективности вдувания ПУТ (с ПГ)

Наименование	База	Повышение температуры дутья до 1100 °С	Кислород в дутье 21 %	Вдувание ПГ	Снижение основности шлака	Вдувание ПУТ			
						60	90	120	150
Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Производительность, %	100	105,9	108,6	108,5	109,6	108,6	109,3	111,3	113
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	564,2	523,6	525,3	498,9	494,8	428,7	397,1	366,5	336,3
Коксовый орешек, кг/т чугуна	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6	34,6
Агломерат, кг/т чугуна	634	634	634	634	634	634	634	634	634
Окатыши, кг т чугуна	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038
Известняк обычный, кг/т чугуна	76	72	72	69	51	49	46	44	43
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1552	1378	1392	1309	1241	1222	1185	1125	1070
Температура дутья, °С	906	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	0	0	0	20	20	20	20	20	20
ПУТ, кг/т чугуна	0	0	0	0	0	60	90	120	150
Содержание кислорода в дутье, %	20,0	20,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	22,5	23,5
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	2154	1947	1887	1880	1808	1783	1745	1684	1630
Температура колошникового газа, °С	240	218	202	215	215	228	227	218	210
Степень использования СО, доли	0,371	0,368	0,367	0,382	0,386	0,404	0,399	0,406	0,411
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1893	1681	1712	1651	1567	1583	1563	1519	1481
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	652	579	613	617	587	617	631	646	660
Выход шлака, кг/т чугуна	416	409	409	404	394	388	386	383	381
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,5	6,1	6,1	5,9	5,9	5,4	5,2	4,9	4,7
Основность CaO/SiO ₂	1,16	1,16	1,16	1,16	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Химсостав чугуна, % [S]	0,061	0,063	0,064	0,064	0,065	0,064	0,063	0,062	0,061
Теоретическая температура горения, °С	2130	2311	2289	2210	2210	2140	2116	2116	2103
Расход условного топлива, кг/т чугуна	601,58	560,77	562,54	559,71	561,66	555,21	553,44	552,63	552,30

При вдувании ПУТ до 150 кг/т чугуна расход кокса снижался линейно от 564 до 357 и 336 кг/т чугуна, соответственно, без ПГ и с ПГ (20 м³/т чугуна).

При этом суммарный коэффициент замены кокса составил 1,38 и 1,52 кг/кг.

Коэффициент замены кокса ПУТ при вычете эффективности компенсирующих мероприятий соответственно снизился и составил 1,13 и 1,17. Высокое значение коэффициента замены объясняется соответственной эффективностью компенсирующих мероприятий: повышением температуры дутья на 190 °С, высоким качеством ПУТ ($S=0,2\%$, $A=7,5\%$) и низким расходом известняка (51-54 кг/т чугуна) и снижением выхода шлака (394-398 кг/т чугуна).

Расход условного топлива снижается до 349,7 и 352,3 кг/т чугуна, соответственно, без ПГ и с ПГ.

Производительность печи при исключении влияния компенсирующих мероприятий составила 99,2 и 96,4% без ПГ и с ПГ.

Литература:

1. Курунов, И.Ф. Современное состояние доменного производства в Китае, Японии, Южной Корее, Западной Европе, Северной и Южной Америке / И.Ф. Курунов // *Металлург*. – 2015. – № 7. – С. 12-22.
2. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 597 с.
3. Катунин, В.В. Основные показатели работы черной металлургии России в 2020 г. / В.В. Катунин, Н.Г. Зиновьева, И.М. Иванова, Т.М. Петракова // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2021. – Т. 77. – № 4. – С. 367-392.
4. Ярошевский, С.Л. Эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна / С. Л. Ярошевский, В. В. Кочура, А. М. Кузнецов и др. // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 9-10. – С. 5-19.
5. Kexin, J. Operation characteristic of super-large blast furnace slag in China / J. Kexin, Z. Jianliang, C. Chunlin, L. Zhengjian and J. Xi // *ISIJ International*. – 2017. – Vol. 57. – No. 6. – pp. 983-988.
6. Production and technology of iron and steel in Japan during 2022 // *ISIJ International*. – 2023. – Vol. 63. – No. 6. – pp. 951-969.
7. Ярошевский, С.Л. Основные принципы расчета и организации технологии доменной плавки при замене дополнительными топливами 30-60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) / С.Л. Ярошевский, З.К. Афанасьева, А.В. Кузин // В кн.: *Творческое наследие Б.И. Китаева. Труды Международной научно-практической конференции 11-14 февраля 2009 г.*, Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138-148.
8. Рамм, А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 303 с.

ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И СВАРКА



ПРАКТИКА РАБОТЫ СКУЛЬПТОРА-ЛИТЕЙЩИКА

Беруля Е. А., Свиногоев Ю.А.

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск

Введение. Практика работы скульптора-литейщика включает ряд общих определяющих этапов.

Пространственное мышление. Скульптор должен «видеть» будущую отливку со всех сторон, включая обратные ракурсы и труднодоступные детали, которые невозможно скорректировать после передачи модели в производство.

Знание технологических ограничений. Например, элементы тоньше 3–4 мм могут не пролиться при отливке, а глубокие подрезы затрудняют извлечение модели из разделочной формы. Также важно учитывать усадку материала (например, усадка бронзы составляет 1,5–2%) при проработке мелких деталей.

Взаимодействие с другими специалистами. Успешная реализация проекта требует слаженной работы с технологами литейной мастерской. Умение чётко объяснять художественный замысел, воспринимать технические рекомендации и находить компромисс между формой и технологичностью определяет успех проекта.

Критическое мышление. Помогает объективно оценивать работу на каждом этапе — от эскиза до готовой отливки. Возможность вовремя заметить ошибку и внести корректировку до передачи модели в производство экономит ресурсы и сохраняет качество конечного результата.

Цель работы состояла в обобщении опыта работы скульптора-литейщика, для выработки общеметодологических алгоритмов подготовки художественного изделия.

Ход выполнения работы.

Процесс создания художественного литого изделия начинается с замысла, который последовательно материализуется через моделирование, изготовление форм и литьё. Эта отчётная работа отражает ключевые этапы превращения абстрактного образа в трёхмерный объект, где каждый шаг — от глины или пластилина до расплавленного металла — требует точности и чутья одновременно.

Процесс моделирования из мягких материалов, таких как глина или пластилин, служит исходной фазой. Здесь я формирую базовую трёхмерную структуру, определяя пропорции, объём и динамику будущей скульптуры. Эта стадия позволяет корректировки без потери материала, закладывая основу для последующего создания гипсовой формы и литья в металл (см. рис. 1).



а) исходная заготовка



б) промежуточная , рабочая модель



б) готовая модель

Рис. 1. Процесс создания модели.

После завершения мягкой модели осуществляется переход к изготовлению опалубки. Используется пластилин, чтобы повторить контуры и защитить рельеф от деформации. Затем наносится первый слой двухкомпонентный силикон. Этот силикон демонстрирует выдающуюся текучесть при низкой вязкости, обеспечивая тем самым высокое качество литейной формы. Кроме того, данный силикон характеризуется повышенной термической устойчивостью. Это свойство обеспечивает возможность отливки восковых моделей без деформации при высоких температурах.

После изготовления силиконовой модели приступаем к возведению кожуха — это своего рода каркас, который удержит силикон.

Затем на поверхность наносится гипс также нельзя забывать про внутренний каркас, обеспечивающий механическую жёсткость конструкции. Этот каркас предотвращает деформацию силикона в процессе последующей литьевой операции и гарантирует стабильность геометрии (см. рис.2).

Эта технология обеспечивает изготовление высокоточной силиконовой формы, при которой исходная пластилиновая модель сохраняет свою целостность и геометрию на протяжении всего цикла.

Процесс начинается с изготовления восковой модели методом контролируемого наплавления. Воск, нагретый до температуры плавления, заливается в силиконовую форму при постоянном контроле температурного режима — примерно шестьдесят пять градусов. Слои накладываются постепенно, каждый с толщиной около одного миллиметра. Толщина итоговой стенки должна составлять от трёх до пяти миллиметров — это оптимально для литья.



Рис. 2. Изготовление литейной модели.

Использование метода контролируемого наплавления позволяет добиться однородного распределения воскового покрытия на силиконовой форме, исключая образование микропустот и локальных перепадов плотности. Это обеспечивает стабильную усадку материала при последующей термообработке и минимизирует вероятность дефектов в конечной металлической отливке.

Технический воск демонстрирует выраженную склонность к усадке и газовыделению, что провоцирует образование микропористости и раковин в литейной модели. Медицинский воск, благодаря очищенной фракции и

контролируемому температурному окну, не даёт таких дефектов — структура получается монолитной, без деформаций.

После формирования восковой модели, её помещают в металлическую опалубку с перфорацией. Данные отверстия обеспечивают диффузию пара при вытопке, предотвращая локальные перегревы и гидростатическое давление. Кроме того, перфорация поддерживает градиент температуры, равномерно прогревая форму и исключая термические разрывы.

После вытопки формы подвергаются термообработке в муфельной печи. Температурный профиль: от 150 градусов четыре часа, затем нагрев до 370 градусов за 2 часа после выдержка 2 часа, затем последующий нагрев до 730 за 4 часа, затем выдержка 4-5 часов. Общее время — пятнадцать часов. Гипс дегидратируется, кристаллическая решётка стабилизируется, прочность растёт.

После извлечения формы из муфельной печи при трёхстах градусах она фиксируется в опоке, заполненной песком. Затем осуществляется гравитационная заливка расплавленной латуни при температуре 1000 градусов, с контролем скорости потока — один миллилитр в секунду.

Через два часа после заливки, когда температура формы упала ниже двухсот пятидесяти градусов, начинается этап извлечения. Опока снимается, песок — просеивается и убирается. Затем кожух подвергается контролируемому разрушению: Гипс дробится на фракции, не повреждая литейную модель. Латунь, уже в твёрдой фазе, обладает прочностью триста мегапаскаль.

После удаления литниковой системы, полученной путём механической резки, модель помещается в пескоструйную камеру. Под давлением восемь бар абразивный поток корунда или карбида кремния снимает микрослой гипса и окисной плёнки. Поверхность становится матовой, шероховатость Ra ноль двадцать микрон. После скульптура подвергается механической доработке: Производится зачистка швов и заусенцев абразивными инструментами. Затем — чеканка по рельефу для усиления объема, шлифовка по контуру для гладкости. Финальный этап — химическое тонирование: нанесение патины (см. рис.3).



Рис. 3 Готовая художественная отливка.

Выводы. Приведенный алгоритм позволяет скульптору-литейщику получать качественные художественные отливки. Приведенный алгоритм может быть дополнен и расширен, в зависимости от решаемых задач.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЛИТЕЙНЫХ СВЯЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Болдырева А.А., Свинороев Ю.А.

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск

Введение. Одной из главных причин, ограничивающих области применения технических лигносульфонатов (ЛСТ) в качестве связующих материалов для производства литья, является не стабильность их свойств и малая связующая способность, при том, что этот вид связующих материалов, среди всей номенклатуры используемых материалов данного типа наиболее дешёвый, не дефицитный и наиболее экологически чистый материал.

Расширение объемов использования ЛСТ в производственных процессах – яркий пример комплексного подхода к решению проблем современного производства, поскольку в этом случае выполняется целый ряд требований и условий безопасной организации производственных процессов, а именно:

- снижается себестоимость продукции (ЛСТ – наиболее дешевый связующий материал в общей номенклатуре этих продуктов);
- улучшается экологическая обстановка в районах размещения данного производства (из производственного цикла выводятся, полностью или частично потенциальные источники вредных выбросов – масляные связующие и синтетические смолы, продукты термической деструкции которых являются токсичными и канцерогенными веществами, а ЛСТ их замещает);
- повышаются санитарно-гигиенические условия труда на рабочих местах (связующие – источники генерации токсинов полностью или частично замещены ЛСТ);
- происходит экономия дорогостоящего ресурса (например – синтетических смол), снижается ресурсоёмкость производства;
- технологический процесс переориентируется на сырьё, производимое из возобновляемого экологически чистого ресурса;
- исходный материал имеет отечественную ресурсную базу.

Цель исследования состояла в разработке подходов, методов, способов и приёмов воздействий на ЛСТ, направленных на повышение их связующей способности, с целью выработки практических рекомендаций по применению этих инструментов в литейном производстве для повышения его эффективности.

Ход выполнения работы.

Перспективность этого направления диктуется необходимостью разработки и применения экологически чистых, относительно дешевых, доступных, технологичных и, в то же время, технически эффективных

отечественных связующих материалов. Схема потенциальных возможностей ЛСТ, как инструмента совершенствования литейных технологий приведена на рисунке 1.

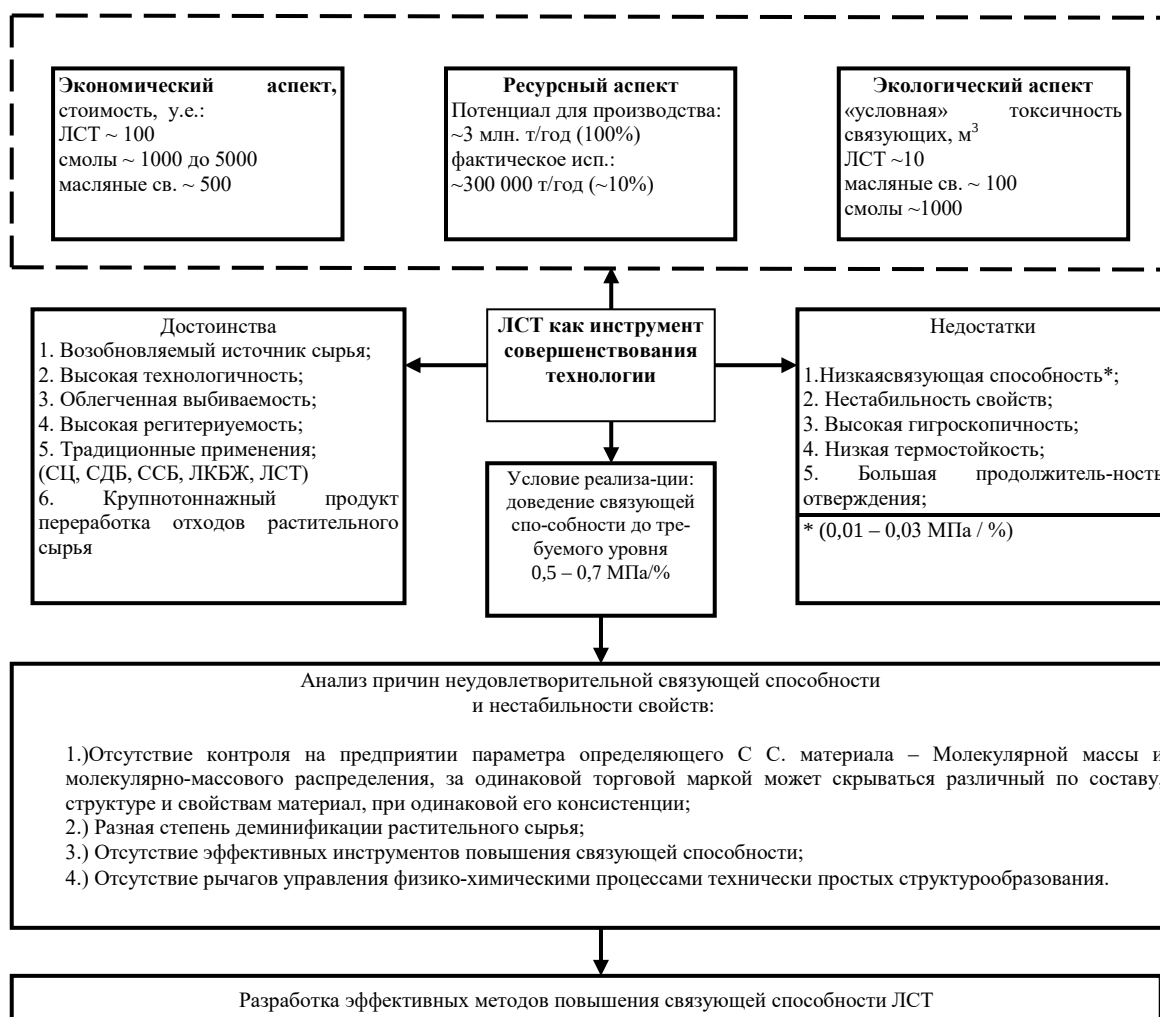


Рис. 1 Концептуальная схема содержания проблемы повышения связующей способности ЛСТ, как инструмента совершенствования литейных технологий.

Объектом исследования являются технические лигносульфонаты - ЛСТ. Рассмотрим их физико-химическую природу. Это вторичный продукт переработки отходов (сульфитного щелока) при делигнификации древесины в процессе сульфитной варки в технологии производства целлюлозы.

На микроуровне ЛСТ представляют из себя полидисперсную коллоидную систему, состоящую из олигомерных цепей лигносульфоновых кислот. Это позволяет предположить, что при определённых условиях возможен процесс сшивки олигомерных цепей ЛСТ в линейный или пространственный полимер. Из этого следует, что решение данной задачи лежит в плоскости поиска способов обеспечивающих протекание процессов структурообразования ЛСТ с

образованием трехмерных сетчатых структур, что в интегральном выражении обеспечит повышенные прочностные характеристики непосредственно литейных стержней и форм.

Эффективность того или иного метода можно оценивать по степени повышения связующей способности ЛСТ, при этом, необходимо контролировать изменение скорости отверждения и влияние рассматриваемого воздействия на стабильность свойств лигносульфонатных связующих. Связующая способность ЛСТ оценивается по прочности на разрыв образца технологической пробы в соответствии с ТУ 13-0281036-05-04. Как правило, этот показатель для ЛСТ соответствует 0.4-0.6 МПа или 0.08-0.12 МПа/% связующего в смеси. Если проводить оценку по удельной связующей способности, то ЛСТ в значительной степени уступает другим связующим материалам (как правило, для традиционно применяющихся, так называемых - эффективных связующих, этот показатель соответствует 0.5-0.8 МПа/%, т. е. на порядок выше).

Для устранения указанных недостатков ЛСТ известно большое разнообразие методов обработки и различных технологических приёмов, однако на практике, в силу разных причин, эффективными оказались лишь несколько из них.

В силу ужесточающихся требований к технологическим процессам литья в аспектах обеспечения норм охраны труда и экологии в литейном производстве все более широко находят применение различные методы повышения технологических свойств связующих материалов, получившие название активации [1,4].

Выводы.

Наиболее эффективным способом повышения связующих лигносульфонатов являются химические методы или методы модифицирования, состоящие во введении в состав ЛСТ модификаторов, действие которых обеспечивает формирование трехмерной пространственной полимерной сетки.

Целесообразно модифицирование применять в комбинации с другими методами обработки ЛСТ, поскольку в этом случае облегчается протекание процессов структурообразования результирующей конструкции образующейся полимерной матрицы.

Экспериментально установлено, что предварительная механическая обработка на высокоэнергетичных дезинтеграторах является инициирующим фактором для протекания полимеризационных процессов в связующем.

Применение тармоактивации ЛСТ позволяет существенно снизить цикл их отверждения, однако её применение требует ужесточения регламентации технологических процессов литья.

ЛСТ является техническим продуктом и представляет собой сложный коллоидный комплекс, являющийся водным раствором солей, как правило натрия, лигносульфоновых кислот с содержанием сухих веществ в пределах 47-51%, со средней молекулярной массой олигомерных цепей от 5000 у.е. до

20000 у.е., все методы повышения их связующих свойств основаны на создании условий структурообразования трехмерных полимерных структур.

Установили что, оптимальное содержание модификатора из класса НПАВ в ЛСТ находится в пределах 8-10%, при таких концентрациях связующая способность композиции максимальна (до 3МПа).

Использованные источники информации.

1. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия. Справочник.; Болдин А.Н. , Давыдов Н.И. , Жуковский С.С. и др. – М.: Машиностроение 507стр., 2006

2. Технология литейного производства: учебное пособие для практических занятий/А.И. Батышев, В.Д. Белов, К.А. Батышев, С.А. Сироткин, Л.Д. Смелянец, Ю.А. Свиногоев, В.Д. Рябичев, Ю.И. Гутько. - Москва, Луганск: изд-во «Перо»/Изд-во ЛГУ им. В.Даля , 2022.-266с.

3. Проектирование и производство заготовок в машиностроении: учебное пособие / Батышев К.А., Батышев А.И., Свиногоев Ю.А., Рябичев В.Д., Гутько Ю.И./Под.ред, К.А. Батышева. - Москва, Луганск: изд-во «Перо»/Изд-во ЛГУ им. В.Даля , 2022.-220с.

4. Основы материаловедения и технология материалов: учебное пособие/ Батышев К.А., Батышев А.И., Безпалько В.И., Семенов К.Г., Свиногоев Ю.А., Рябичев В.Д., Гутько Ю.А. - Москва, Луганск: изд-во «Перо»/Изд-во ЛГУ им. В.Даля , 2021.-374с.

5. Мельников А.П., Кукуй Д.М. Современные тенденции развития технологии в литейном производстве// Литье и металлургия - №3 (47). 2008. С. 65-80

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ ФАЯЛИТА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПРОЦЕССЕ

Хворостов Д.В., Пасечник А.Ю.

Донецкий национальный технический университет

Фаялит (Fe_2SiO_4) — железосодержащий минерал группы оливина, основной компонент силикатных шлаков чёрной металлургии. В медных шлаках он часто встречается вместе с магнетитом и пиритом. Считается трудно восстанавливаемым соединением.

Основные проблемы восстановления фаялита - высокая химическая устойчивость

Фаялит обладает прочной кристаллической решёткой, что затрудняет его разложение и извлечение железа. Для разрушения структуры требуются высокие температуры (свыше 1200°C), активные восстановители, флюсующие добавки.

Наличие окиси кремния делают шлаки очень вязкими, в связи с чем увеличиваются потери металла, ухудшается разделение металла и шлака, кроме того возможно образование тугоплавких соединений. В качестве флюсов используют CaO и Na_2O . Использование данных флюсов имеет ряд недостатков:

- CaO требует более высоких температур, менее эффективен термодинамически.

- Na_2O более эффективен, однако избыток может вызвать разрушение футеровки, загрязнение конечного продукта [1].

В медных шлаках фаялит-магнетито-пиритового типа возникают дополнительные сложности: плохая флотированность окисленных форм меди; скрытокристаллические структуры, не раскрывающиеся даже при тонком измельчении ($-0,044$ мм).

Представляет интерес получение ферросилиция из фаялита, однако в результате расчета энергии Гиббса реакции



Получение чистого ферросилиция из фаялита коксом маловероятно при реальных температурах ($<2000^\circ\text{C}$), так как ΔG для полного восстановления остается положительным или близким к нулю, а K низкие.

Однако можно значительно сдвинуть равновесие в сторону Fe-Si сплава (ферросилиций низкой силицидности) мерами по снижению активности SiO_2 .

С этой целью проведение процесса более выгодно в условиях жидкофазного восстановления при реализации электрошлакового процесса.

Был проведен термодинамический анализ процесса и получена зависимость Энергия Гиббса от температуры T :

$$\Delta GT^\circ = 742,3 - T \cdot 0,7088 \text{ (кДж/моль)}$$

при температурах электрошлаковой печи ($1600-2000^\circ\text{C}$) $\Delta G < 0$, реакция термодинамически возможна.

Таблица 1 – Зависимость ΔG от температуры

Температура, К	ΔG , кДж/моль
1873	$742,3 - 1873 \cdot 0,7088 = -585,1$
2073	$742,3 - 2073 \cdot 0,7088 = -727,0$
2273	$742,3 - 2273 \cdot 0,7088 = -868,9$

Учитывая, что происходит растворение продукта в железе, коэффициент активности кремния γ_{Si} для разбавленных растворов составит $\gamma_{Si} \approx 0,1-0,3$, что дополнительно понизит энергию Гиббса, например, для температуры 2073К

$$RT \ln \gamma_{Si} = 8,31 \cdot 2073 \cdot \ln 0,2 \approx -27,7 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta G_{2073} = -727,0 - 27,7 = -754,7 \text{ кДж/моль}$$

Таким образом можно выделить ряд мер по повышению константы равновесия реакции получения ферросилиция

- **Повысить температуру:** До 1800°C (электрошлаковый процесс это позволяет),

- **Добавить CaO (основность шлака >1.2):** Снижает активность $_{SiO_2}$ до 0.1-0.5 по модели Темина, сдвигая $\lg K$ на 1-2 единицы за счет протекания реакции $CaO + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3$ [3][4] [2]

- **Использовать полукокс или мелкий кокс:** Увеличивает реакционную поверхность, ускоряя кинетику (до 15% летучих)

- **Снизить p_{CO} :** удаление газов или добавка $CaCO_3$ для реакции $CO + CaO \rightarrow CaCO_3$, повышает константу равновесия в 10-100 раз.

- **Добавить оксиды Fe- или сталь:** Увеличивает долю Fe в сплаве, облегчая растворение Si- (возможно увеличение содержания Si в продукте до 10%).

Таким образом, в электрошлаковой печи улучшаются условия для реакции за счет кинетических факторов: интенсивный массоперенос за счёт электродинамического перемешивания; равномерный нагрев всего объёма шлака; поддержание восстановительной атмосферы; контроль окислительно-восстановительного потенциала.

Литература:

1. Хожиев, Ш. Т. Сравнительный термодинамический анализ флюсующих добавок Na_2O и CaO при восстановлении железа из силикатных шлаков чёрной металлургии / Ш. Т. Хожиев, Д. Б. Холикулов, С. С. Муталибхонов, И. И. Шайманов, Г. Ма // Название журнала. — 2025г. — № 9. — С. 13–24

2. Якушевич, Н. Ф. Анализ фазово-химических равновесий в системе расплав (Fe–Si–C)–шлак ($CaO-Al_2O_3-SiO_2$)–газ ($O_2-SiO-CO$) / Н. Ф. Якушевич, О. А. Полях, Г. В. Галевский, А. А. Тяжина // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. — 2015. — Т. 58, № 5. — С. 316–321.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК МЕТОДАМИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ

Коверга А. П., Свино́роев Ю.А.

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск

Введение. Центробежное литье или ротационное литье — это метод литья, который обычно используется для изготовления тонкостенных цилиндров [1]. Он обычно применяется для литья таких материалов, как металлы, стекло и бетон. Высокое качество достигается за счет контроля над металлургическим процессом и кристаллической структурой. В отличие от большинства других методов литья, центробежное литье в основном используется для изготовления симметричных по отношению к оси вращения заготовок стандартных размеров для дальнейшей обработки, а не фасонных деталей, предназначенных для конкретного применения.

При центробежном литье постоянная форма вращается с высокой скоростью (от 300 до 3000 оборотов в минуту), в то время как в нее заливается расплавленный металл. Расплавленный металл растекается по внутренней стенке формы, где затвердевает после остывания. Как правило, отливка имеет мелкозернистую структуру с особенно мелкозернистым внешним диаметром из-за быстрого охлаждения на поверхности формы. Более легкие примеси и включения перемещаются к внутреннему диаметру и могут быть удалены после литья [2].

Цель работы — исследовать технологию центробежного литья, выявить её преимущества и недостатки и разработать предложения по устранению обнаруженных проблем.

Центробежное литье применяется для крупносерийного производства, в основном цилиндрических изделий — труб и цилиндров для различных машин, агрегатов и приспособлений.

Применение технологии центробежного литья чугуна позволяет получить изделия высокой точности и качества. Эта технология подходит для изготовления деталей различных размеров для установки на автомобили, корабли, самолеты, спецтехнику и т. д.

Сфера применения деталей, изготовленных центробежным литьем чугуна очень большая, и постоянно расширяется. Отличается многими преимуществами и применяется на всех современных литейных заводах [3].

Основные технологические аспекты:

1. Выбор типа формы и оси вращения

Используют металлические, керамические, оболочковые, резиновые и песчаные формы. Ось вращения может быть горизонтальной, вертикальной или наклонной. Для длинных труб малого и среднего диаметра чаще применяют горизонтальные машины, для крупногабаритных труб — вертикальные.

2. Скорость вращения формы

Это один из критически важных параметров. При недостаточной

скорости может не получиться отливка требуемой конфигурации, а при чрезмерно высокой — возникнут риски трещин, пригара, ликвации компонентов сплава.

3. Заливка металла

Расплавленный чугун заливают во вращающуюся форму через заливочный желоб. При этом металл под действием центробежных сил растекается по внутренней поверхности формы, формируя пустотелый цилиндр. Важно точно дозировать металл — это можно делать с помощью мерного ковша или путём взвешивания.

4. Охлаждение формы

Часто используют водяное охлаждение формы. Это влияет на скорость затвердевания металла и его структуру.

5. Структура металла

Необходимо контролировать равномерность структуры по толщине стенки трубы. Например, при интенсивном охлаждении первые слои металла могут затвердевать с образованием цемента, а внутренние — с образованием перлитоферритной структуры. Для получения однородной структуры могут применяться специальные методы заливки (например, двумя струями с заданным расходом одной из них и введением добавок в первую струю).

6. Подготовка оборудования

Включает подготовку ковша, желоба, стержней и изложницы. Например, ковш выкладывают шамотным кирпичом, просушивают и нагревают, а желоба покрывают графитовой краской и снова просушивают.

7. Извлечение трубы

После затвердевания металла трубу извлекают из формы с помощью специальных клещей.

Анализ достоинств и недостатков исследуемого технологического процесса

Достоинства:

1. Высокое качество машин и агрегатов обеспечивается надежными деталями, изготовленными с помощью современных технологий. Литье из чугуна отличается сложностью и необходимостью тщательно следить за состоянием жидкого металла и формой. Среди достоинств этого метода можно назвать:

- высокое качество;
- рост производительности;
- надежность;
- отсутствие раковин.

2. Также при литье с применением центробежных сил уменьшается необходимость в большой площади и в приобретении новых форм, стержней и прочих дополнительных материалов.

3. Процесс обычно механизмуется и автоматизируется. Для обслуживания не нужно много рабочих. Высокое качество и характеристики достигаются при помощи непрерывного вращения формы, в которую заливают

расплавленный чугун. Возникающее внутри давление прижимает металл к стенкам формы, выдавливает весь газ и позволяет получать продукцию с минимальным количеством дефектов.

В сравнении с традиционными методами центробежное литьё чугуна является более прогрессивным и эффективным: для него требуются специализированные машины и квалифицированный персонал, а получаемые отливки имеют более высокое качество и позволяют за смену выпускать требуемое число болванок.

Недостатки:

- трудность получения качественных отливок из ликвирующих сплавов;
- неточность диаметра внутренней полости отливок;
- загрязнение свободной поверхности отливок неметаллическими включениями;
- у толстостенных отливок поверхность может иметь пористость, что увеличивает припуск на механическую обработку свободных поверхностей;
- необходимость в специальных машинах и дорогостоящих литейных формах, которые должны иметь высокие прочность и герметичность из-за повышенного давления металла.

Установка и обслуживание

Установку машин для центробежного литья выполняют опытные специалисты на специально отведённой площадке. Перед запуском проверяют оборудование, состояние формы и заливного окна. Вращение обеспечивает мощный электродвигатель, а число оборотов регулируется с пульта управления.

Параметры зависят от марки чугуна и требований к конечной заготовке. Скорость вращения формы можно увеличивать и уменьшать, поэтому на выходе появляется заготовка с необходимыми характеристиками. Машина нуждается в периодическом осмотре и обслуживании.

Формирование чугунных напорных труб при центробежном литье требует решения комплекса технологических задач, связанных с выбором и состоянием оборудования, настройкой режимов процесса, обеспечением качества материалов и организацией надёжного контроля готовой продукции.

При выборе центробежного литья оборудования важно учитывать тип машины (горизонтальная или вертикальная ось вращения), массу заливки, систему охлаждения и смазки подшипников.

Горизонтальные машины подходят для длинных труб (до 6 м) малого и среднего диаметра (до 600 мм). Они проще в обслуживании, но при больших диаметрах может возникать проблема прогиба формы под весом расплава, что влияет на равномерность стенки.

Вертикальные установки идеальны для крупногабаритных труб (от 400 мм и выше). Расплав распределяется симметрично, а форма не подвергается изгибающим нагрузкам.

При выборе оборудования также стоит обращать внимание на плавность регулировки частоты вращения формы, особенно на этапе заливки, и запас по грузоподъёмности (минимум 20% относительно массы заливки).

Выводы.

Анализ технологий производства чугуновых напорных труб показывает, что центробежное литьё остаётся наиболее эффективным и перспективным способом получения высококачественной трубной продукции. За счёт действия центробежных сил металл уплотняется по радиусу, что существенно снижает пористость и предотвращает образование усадочных раковин — это обеспечивает высокую плотность отливок и однородную микроструктуру, критичную для напорных условий эксплуатации.

Благодаря воздействию центробежных сил удастся достичь высокой плотности металла, исключить образование газовых пор и усадочных раковин, что критически важно для напорных систем.

Основными трудными моментами рассматриваемой технологии являются : трудность получения качественных отливок из ликвирующих сплавов; неточность диаметра внутренней полости отливок; загрязнение свободной поверхности отливок неметаллическими включениями и ликватами; ограниченность по конфигурации отливаемых деталей; высокие требования к прочности и балансировке литейных форм; необходимость специализированного дорогостоящего оборудования; возможность образования поверхностного отбела и больших внутренних напряжений в отливках;

Выявленные недостатки можно устранить: предотвращение образования газовых дефектов; предотвращение продольных трещин; устранение усадочных дефектов; избегание спаев и заливов; компенсация усадки.

Литература.

1. Шевченко А. И. Центробежное литьё под флюсом: монография / Шевченко А. И. ; Академия наук Украины, Институт проблем литья. - Киев : Наукова думка, 1991. - 190 с.
2. Centrifugal casting (industrial) [Электронный ресурс] // Wikipedia : свободная энциклопедия. — URL: (дата обращения: 15.05.2026).
3. Центробежное литьё — это... [Электронный ресурс] // Inner.su. — URL: (дата обращения: 15.05.2026).
4. АНДРУШЕВИЧ А.А., ОХОТСКИЙ А.Д. Центробежное литье — перспективная технология производства деталей для сельскохозяйственных машин//Минск – Литье и металлургия, №2,с.23-27

ВОЗМОЖНОСТИ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Медведев И.И., Пасечник А.Ю.

Донецкий национальный технический университет

Многие металлы (Fe, Zn, Sn, Pb, Nb, Cu, Ni). в настоящее время получают из оксидных руд с использованием в качестве восстановителя твердого углерода и СО. Процессы восстановления, реализуемые в печах шахтного типа, как правило, непрерывные, что определяет стабильную работу агрегата, высокие технико-экономические показатели. Современное производство стали в большой степени зависит от работы доменных печей, коксохимических заводов, агломерационных фабрик, добычи коксующихся углей. Эффективность восстановления определяется сложным и многоступенчатым характером процесса.

В настоящее время преобладает адсорбционно-автокаталитическая теория [1] механизма восстановления, которая включает следующие стадии:

1. Внешняя диффузия восстановителя из газового потока к поверхности восстанавливаемого оксида.
2. Адсорбция восстановителя на реакционной поверхности оксида.
3. Внутренняя диффузия восстановителя к реакционной зоне через поры и дефекты решётки слоя твёрдого продукта восстановления.
4. Кристаллохимическое превращение: переход кислорода из решётки оксида к адсорбированным молекулам восстановителя с одновременной перестройкой кристаллической решётки исходного оксида в решётку продукта восстановления.
5. Десорбция газообразного продукта восстановления в газовую фазу.
6. Отвод газообразных продуктов восстановления в газовый поток за счёт внутренней и внешней диффузии.

Автокаталитический характер процесса проявляется в том, что образование твёрдого продукта реакции ускоряет его дальнейшее образование. На определённом этапе восстановления наблюдается максимум скорости, что соответствует кинетическому режиму.

На скорость восстановления газами влияют: размеры кусков оксидного материала, пористость руд, скорость движения потока газа-восстановителя, состав газа, давление и температура.

Прямое восстановление углеродом не носит определяющего характера, ввиду малой поверхности контакта углерода и окисла и может быть более сложным и включать несколько этапов с участием промежуточных газообразных продуктов. Например, при восстановлении оксидов твёрдым углеродом часто наблюдается участие газообразных восстановителей (СО, Н₂). На скорость прямого восстановления оксидов твёрдым углеродом решающее влияние оказывают факторы, влияющие на скорость реакции газификации углерода: температура, активность углерода, наличие

катализаторов.

На кинетику процесса также влияют: исходная физическая структура оксида, её изменение в процессе восстановления, химический состав, строение и физико-химическое состояние поверхностных слоёв оксидов.

Процессы, реализуемые в доменной печи, требуют большого количества углерода и снижение его расхода - эффективный путь снижения себестоимости. Одним из путей является реализация жидкофазного восстановления (ЖФВ).

В условиях ЖФВ восстановление протекает через многофазную систему (металл–шлак–газ–твёрдое), где ключевыми восстановителями выступают: твёрдый углерод (уголь, кокс), растворённый углерод в металле [C], газообразные восстановители (CO, H₂).

Основные реакции:

Прямое восстановление твёрдым углеродом:



Восстановление растворённым углеродом:



Газификация углерода (реакция Будуара):



Преимуществами данного процесса являются следующие особенности:

- Расплавление и растворение оксидов в шлаке, что значительно увеличивает поверхность контакта руды и восстановителя:

- быстрое прогревание шихты в шлаковой ванне;
- растворение FeO в шлаке с образованием гомогенной среды, с быстрым отводом продуктов реакции восстановления с поверхности контакта;
- барботаж и перемешивание позволяют не создавать зон с повышенной концентрацией отдельных компонентов шихты;
- формируется вспененный шлак с развитой межфазной поверхностью.

Скорость процесса в диффузионной области определяется:

- подводом FeO к реакционным зонам (граница газ–шлак, металл–шлак);
- отводом продуктов (CO) от реакционных поверхностей;
- диффузией углерода из объёма металла к границе раздела фаз.

Скорость непосредственно химического взаимодействия зависит от:

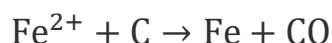
- адсорбции FeO на межфазной поверхности;
- восстановления до металлического железа;
- образования зародышей металлической фазы.

В настоящей работе представлена модель процесса жидкофазного восстановления Fe₂O₃, в качестве жидкой фазы используется расплавленный электрошлаковым способом доменный шлак, размер частиц Fe₂O₃ - 0,5 мм, размер частиц восстановителя - кокса 0,5 мм.

Для этого использовали упрощённую модель внешнего массообмена и реакций на границе твёрдая фаза – шлак с учётом температурной зависимости.

При жидкофазном восстановлении Fe₂O₃ в доменном шлаке протекают следующие реакции:





При этом лимитирующая стадия — массоперенос ионов железа к коксу и реакция на поверхности кокса, что описывается кинетической моделью:

$$\frac{dX}{dt} = k(T) \cdot (1 - X)$$

где X — степень восстановления (выход металла по Fe_2O_3), $k(T)$ — константа скорости, зависящая от температуры.

Температурная зависимость скорости.

Предполагается, что в широком диапазоне температур 1000–1800 °С доменный шлак обеспечивает достаточно высокий коэффициент массопередачи. Как показано в работах по восстановлению Fe_2O_3 и окалины, скорость процесса заметно возрастает с уменьшением размера частиц за счёт увеличения удельной поверхности и площади контакта между оксидом и восстановителем. В жидкофазных процессах восстановления в шлаке отмечено, что при переходе к мелким фракциям (0,5–1 мм) скорость реакции существенно повышается по сравнению с крупными кусками. Константа скорости условно может приниматься пропорциональной $1/r$ радиуса частиц, что при уменьшении размера с 2,5 мм до 0,25 мм приводит к десятикратному увеличению эффективной скорости восстановления [2,3] Константа скорости реакции выражается зависимостью

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

где $A = 10^7$ 1/с, $E_a = 150$ кДж/моль (характерное значение для восстановления Fe-оксидов в расплаве с коксом), $R = 8,314$ Дж/(моль·К), T в Кельвинах.

Выход продукта реакции можно определить по зависимости:

$$X(t, T) = 1 - \exp(-k(T) \cdot t)$$

где t — время реакции (с).

Рассчитана степень восстановления X (Таблица 1) при времени $t = 60$ с, температурах 1000–1800 °С с шагом 100 °С.

Таблица 1 Степень восстановления X Fe_2O_3 (выход металла) в зависимости от времени t и температуры T .

$T, ^\circ\text{C}$	$k(T), 1/\text{с}$	$t = 60 \text{ с}$	$t = 300 \text{ с}$	$t = 600 \text{ с}$	$t = 1200 \text{ с}$	$t = 1800 \text{ с}$
1000	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,10	0,19	0,34	0,46
1100	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,46	0,72	0,92	0,97
1200	$9,5 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,90	0,997	≈1,00	≈1,00
1300	$3,6 \cdot 10^{-2}$	0,88	0,9997	≈1,00	≈1,00	≈1,00
1400	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,9992	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00
1500	$3,6 \cdot 10^{-1}$	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00
1600	1,0	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00
1700	2,5	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00
1800	5,9	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00	≈1,00

Выводы:

1. полученные данные позволяют говорить о очень высокой скорости протекания процессов восстановления, так уже при температуре 1400°C выход продуктов реакции составляет 99% от максимально возможного всего за 1 минуту, что в десятки раз быстрее, чем в условиях плавки в шахтной печи.

2. Использование доменного шлака не требует больших затрат на приобретение сырья

Литература

1. Чуфаров Г.И., Татиевская Е.А. Адсорбционно-каталитическая теория восстановления окислов металлов // Проблемы металлургии. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 15 – 32

2. А. Н. Крутилин, М. Н. Кухарчук, О. А. Сычева, Г. В. Стасевич. К вопросу восстановления окалина // Литье и металлургия 2011. №1(59) С. 34–37.

3. Григорьева, И. М. Оксид железа, полученный термоконверсией железной соли монокарбоксилцеллюлозы, в синтезе феррита цинка / И. М. Григорьева, И. А. Башмаков, Л. В. Соловьёва, Т. Ф. Тихонова, Ф. И. Капуцкий // <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/252035/1/6-10.pdf?ysclid=mp9n0nq33n865783119>URL: (дата обращения: 04.05.2026).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ИЗ ЛАТУНИ

Серга П.В., Свиногоев Ю.А.

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск

Введение. Развитие современного машиностроения и декоративно-прикладного искусства неразрывно связано с совершенствованием технологий литейного производства. В условиях перехода к новому технологическому укладу особое значение приобретает прецизионное литье, позволяющее получать изделия сложной геометрической формы с минимальными припусками на механическую обработку. Художественное литье, как специфическая область металлургии, требует не только глубоких знаний в области термодинамики и материаловедения, но и понимания эстетических свойств сплавов[1].

Одним из наиболее востребованных материалов для создания малых архитектурных форм и ювелирной пластики является латунь марки ЛС59-1, сочетающая в себе высокие литейные свойства с отличной обрабатываемостью резанием [2,3].

Цель работы состояла в анализе технологического цикла изготовления статуэтки «Дама с веером» на базе кафедры цифровых технологий и машин в литейном производстве ЛГУ им. В. Даля.

Ход выполнения работы. Выбор метода литья по выплавляемым моделям обусловлен необходимостью точного воспроизведения микрорельефа поверхности, включая складки платья и детализацию лица фигурки. Технология литья по выплавляемым моделям базируется на использовании неразъемных огнеупорных форм, получаемых по разовым моделям. Этот метод позволяет исключить наличие традиционных литейных уклонов и минимизировать количество разъемов, что критически важно для художественных объектов. В рамках данной работы рассматривается полный цикл производства: от создания мастер-модели до финишной полировки готового изделия.

Физико-химические основы выбора сплава ЛС59-1

Для реализации проекта была выбрана латунь марки ЛС59-1. Это многокомпонентный сплав на медной основе, легированный цинком и свинцом. Свинец в данном сплаве играет роль «внутренней смазки», что существенно облегчает процесс удаления литниковой системы и последующую гравировку деталей. Однако наличие свинца требует строгого контроля температуры перегрева расплава, так как при температурах выше 1000 °С начинается интенсивное испарение цинка и окисление свинцовистых включений.

Химический состав сплава согласно ГОСТ 15527-2004 обеспечивает оптимальное сочетание пластичности в интервале температур выплавления воска и прочности после окончательного остывания. Стоит отметить, что ЛС59-1 обладает повышенной коррозионной стойкостью по сравнению с простыми

латунями, что гарантирует долговечность художественного изделия в условиях интерьерного размещения.

Описание этапов изготовления на основе фотофиксации процесса

Процесс изготовления художественной отливки, зафиксированный в ходе экспериментальных работ, разделяется на несколько ключевых стадий, каждая из которых определяет качество конечного результата.

Формирование первичной оснастки и получение восковой модели

На начальном этапе изготавливается прототип из пластика или дерева. На основе прототипа создается эластичная или гипсовая форма. На предоставленном рис. 1 отчетливо видны две половины гипсовой формы, предназначенной для получения восковых реплик. Форма имеет сложную конфигурацию, повторяющую контуры женской фигуры, включая расширяющуюся к основанию юбку и поднятую руку с веером. Чистота поверхности формы, свидетельствует о качественной подготовке поверхности мастер-модели.



Рис. 1. Гипсовая форма

Рисунок 2 демонстрирует процесс позиционирования модели в опоке при создании первой половины формы.



Рис.2 Создание литейной формы

Здесь критически важным является выбор плоскости разъема, которая должна проходить по наиболее выступающим частям фигуры, чтобы обеспечить беспрепятственное извлечение восковой модели без повреждения тонких деталей.

После сборки формы в нее под давлением нагнетается расплавленный модельный состав.

На рис. 3 представлено сравнение эталонной пластиковой модели (справа, светлая) и полученной восковой реплики (слева, темная).



Рис. 3 Эталонная и пластиковая модель

Восковая модель (восковка) является точной копией оригинала. Любые дефекты, возникшие на этой стадии (воздушные пузыри, недоливы), должны быть устранены вручную с помощью нагретых стеков, так как металл в точности повторит геометрию воска. Создание керамической оболочки и заливка металла. Далее восковая модель объединяется с литниковой системой в единый блок. На восковку наносится несколько слоев огнеупорной суспензии и обсыпки (электрокорунд, кварцевый песок). После высыхания всех слоев воск выплавляется, а форма прокаливается при температуре около 900 °С.¹ Это необходимо для удаления остатков влаги и придания керамике механической прочности.

Рис. 4 демонстрирует результат заливки латуни ЛС59-1 в форму. Отливка находится в «черновом» состоянии, непосредственно после удаления керамической корки. Видны следы литниковой системы в нижней части (пьедестал) и некоторое количество облоя по линии разъема первичной формы. Поверхность имеет характерный матовый золотистый оттенок с остатками пригара, что является нормальным для процесса литья по выплавляемым моделям до проведения очистных операций.

Финишная обработка художественного изделия. Заключительный этап включает отделение литников, механическую зачистку швов и полировку. На рис. 5 показано готовое изделие.



Рис. 4 Оливка



Рис.5 - Изделие

Поверхность статуэтки приобрела зеркальный блеск, подчеркивающий детализацию рельефа. Высокая обрабатываемость ЛС59-1 позволила добиться идеальной гладкости на открытых участках поверхности. Применение мягких кругов обеспечивает высокий коэффициент отражения света, что придает изделию эстетическую ценность.

Выводы. В ходе выполненной работы был успешно реализован полный технологический цикл изготовления художественного изделия из латуни ЛС59-

1 методом литья по выплавляемым моделям. Анализ процесса показал, что выбор материала оправдан его высокими литейными и декоративными свойствами. Фотографические материалы подтверждают высокую степень детализации отливки на всех стадиях — от восковки до финального полированного изделия. Сочетание традиционных методов формовки с современными подходами к обработке материалов, практикуемое в Институте технологий и инженерной механики, позволяет готовить высококвалифицированных специалистов, способных решать сложные инженерные и творческие задачи в области металлургии.⁴ Дальнейшее развитие исследования может быть направлено на изучение влияния различных защитных покрытий (патинирования) на долговечность латунных художественных изделий в условиях агрессивной городской среды.

Литература.

1. Овчинникова А. О. Изготовление литейных форм для получения художественных отливок по выплавляемым моделям А. О. Овчинникова, Е. Л. Фурман // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 82-й Международной научно-технической конференции: Матер. конф. Магнитогорск Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. С. 170.

2. Технология литейного производства: учебное пособие для практических занятий/А.И. Батышев, В.Д. Белов, К.А. Батышев, С.А. Сироткин, Л.Д. Смелянец, Ю.А. Свиногоев, В.Д. Рябичев, Ю.И. Гутько. - Москва, Луганск: изд-во «Перо»/Изд-во ЛГУ им. В.Даля, 2022.-266с.

3. Проектирование и производство заготовок в машиностроении: учебное пособие / Батышев К.А., Батышев А.И., Свиногоев Ю.А., Рябичев В.Д., Гутько Ю.И./Под.ред, К.А. Батышева. - Москва, Луганск: изд-во «Перо»/Изд-во ЛГУ им. В.Даля, 2022.-220с.

ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫЕ СМЕСИ С ОБЛЕГЧЕННОЙ ВЫБИВАЕМОСТЬЮ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

Шинкарева А.А. Свиноров Ю.А., Шинкарева Т.А.
Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск

Введение. Главной причиной, сдерживающей широкое применение жидкого стекла в качестве связующего для производства стальных железнодорожных отливок, является неудовлетворительная выбиваемость стержней и форм на их основе.

Целью настоящего исследования, является комплексная технологическая оценка возможностей применения *литейных смесей на жидком стекле, с облегченной выбиваемостью*, в процессах производства стальных отливок.

Ход выполнения работы. Динамика изменения прочностных характеристик жидкостекольных композиций характеризуется наличием двух максимумов прочности в процессе прогрева смеси при заливке литейной формы расплавом металла (при температурах 300 и 800⁰С, согласно рисунку 1).

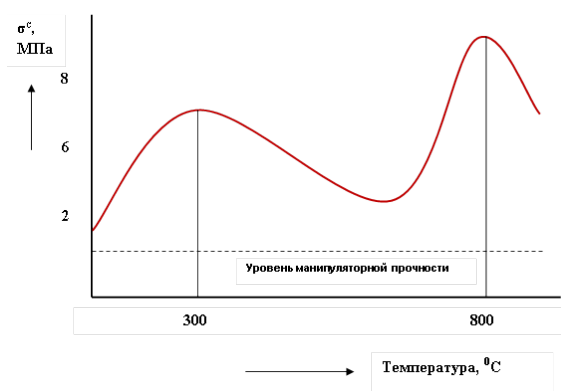


Рисунок 1 – Характеристическая кривая изменения прочности на сжатие жидкостекольных смесей при нагреве.

Для решения указанной проблемы проведен анализ российского опыта использования жидкостекольных связующих [1], рассмотрены многочисленные научные публикации, посвященные этому вопросу [2,3,4].

Учитывая масштабность применения связующих материалов в литейном производстве и специфику полиморфизма жидкостекольных материалов в процессе нагрева, было предложено применить в качестве агентов — модификаторов разупрочнения комбинацию материалов, включающую блок компонентов, работающий на разупрочнение в диапазоне низких температур (200-300 °С), и блок компонентов, работающий в диапазоне высоких температур (700-800 °С).

Предлагаемое технологическое решение основано на совмещении процессов деструкции компонентов модификатора с процессами, формирующими максимальную прочность жидкого стекла при его

полиморфном превращении при прогреве смеси (рисунок 2).

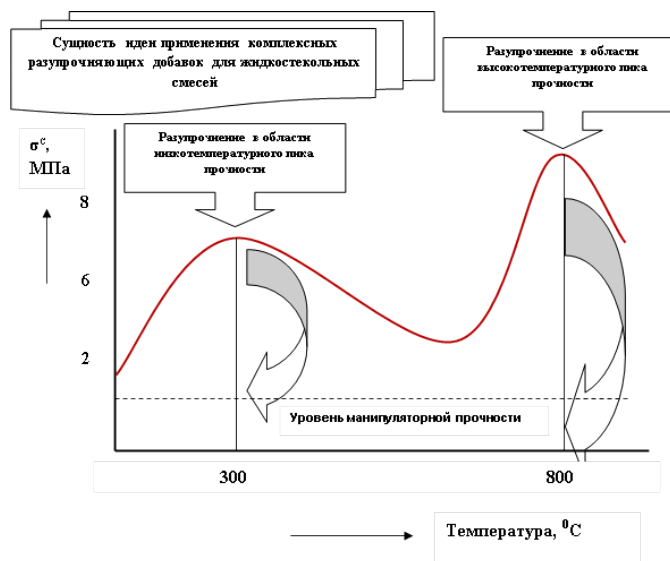


Рисунок 2 – Концепция разупрочнения жидкостекольных смесей.

Предлагается в качестве исходных материалов для разупрочнения жидкостекольной композиции в области низких температур (пик в области 280-300 °С, согласно рисунку 3), взять технический лигнин, представленный в щелочном формате, в частности гидролизный лигнин (рН ~ 10-12), являющийся крупнотоннажным отходом гидролизного **производства**.

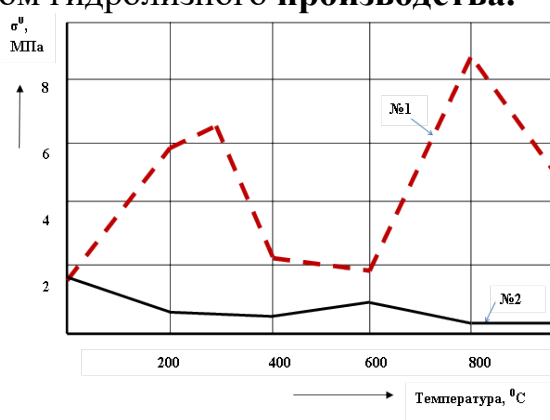


Рисунок 3 – Показатели остаточной прочности жидкостекольных смесей различных составов: №1 - модельный состав смеси на жидком стекле без разупрочнителей; №2 – состав смеси с разупрочняющей добавкой.

Этот продукт производится в России, является недорогим и недефицитным материалом. Щелочная основа гидролизного лигнина обеспечивает взаимное совмещение с жидким стеклом. Проведенная серия предварительных экспериментов показала положительный результат.

Для разупрочнения в области высоких температур (пик в области 800°С, согласно рисунку 2), предлагается взять неорганические материалы: глину и/или вермикулит.

Поведение глины в процессах структурообразования изучено в работе, где показана разупрочняющая роль метакаолина в процессах формирования прочности композиции.

Исследование эффективности практического применения предлагаемого метода разупрочнения жидкостеклового связующего, на примере применения в стержневых смесях (материалы и методы испытаний).

В производственных условиях проводились опытно-промышленные испытания предлагаемых составов стержневых смесей (таблица 1).

Таблица 1 – Составы стержневых смесей для проведения опытно-промышленных испытаний

Состав компонентов	Предлагаемая смесь, % (по массе)	Заводской состав смеси, % (по массе)
Наполнитель (1K02Б)	100	100
ЖС (М 2,6)	5,0	5,0
Сода	1,0	1,4
Крошка асбеста	2,0	2,5
Разупрочняющая добавка (технический лигнин, каолин, в соотношении массовых частей 1:1)	1,6	-

В качестве исходных материалов использовались: наполнитель – кварцевый песок марки 1K02Б Верхнеднепровского карьера, жидкое стекло (ЖС) с силикатным модулем 2,6, технологические добавки (асбестовая крошка, сода), а также предлагаемая разупрочняющая добавка, включающая технический лигнин и каолиновую глину.

Показатель энергетических затрат при выбивке стержня определяли по методике.

По стандартным методикам определяли свойства смеси: прочность в неотвержденном, «сыром» состоянии – на сжатие, в отвержденном, «сухом» состоянии – на разрыв (согласно ГОСТ 23409.7-78), влажность (согласно ГОСТ 23409.5-78), газопроницаемость (согласно ГОСТ 23409.6-78).

Физико-механические показатели исследуемых смесей представлены в таблице 2.

Также, по технологической пробе для толщин стенок 5 и 20 мм, проводили оценку выбиваемости исследуемых стержневых смесей. Технологические пробы заливались сталью марки 20ГЛ при температуре 1580⁰С.

Из приготовленных жидкостеклоных смесей (таблица 1) изготавливали стержни, в виде цилиндрических образцов 50х50 мм (по методике согласно ГОСТ 23409.7-78), которые подвергали сушке в сушильном шкафу (в течении 45 мин., при температуре 220⁰С). После выемки из сушильного шкафа их охлаждали до комнатной температуры. Охлажденные образцы устанавливали в форму и заливали сталью при температуре 1580⁰С. По извлечении из формы отливки охлаждались на воздухе, затем отделялась знаковая часть стержня. После этого проводили взвешивание отливки со стержнем для определения общей массы, после чего на лабораторном копке удаляли стержень. По

окончании процесса отливка взвешивалась, и проводили расчет в соответствии с методикой.

Результаты измерений удельной работы выбивки приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Физико-механические показатели исследуемых смесей

Свойства	Предлагаемая смесь, % (по массе)	Заводской состав смеси, % (по массе)
«Сырая» прочность на сжатие, кг/см ²	0,27	0,23
Влажность, %	3,6	3,7
Газопроницаемость, ед.	311	203
«Сухая» прочность на разрыв высушенных образцов, МПа	3,1	2,7
Выбиваемость (визуально, после извлечения отливки из формы)	Отработанная смесь литейного стержня высыпалась при незначительном постукивании по корпусу отливки, выбивка не представляла затруднений	Отработанный литейный стержень представлял из себя прочное спекшееся монолитное тело, выбивка затруднена

Таблица 3 – Характеристики работы выбивки технологической пробы

Толщина стенки технологической пробы	Удельная работа выбивки для предлагаемой смеси с разупрочняющей добавкой Дж/г	Удельная работа выбивки для заводской смеси, Дж/г
5 мм	0,16	0,67
20 мм	0,08	0,60

Приведенные в таблице 3 результаты показывают, что работа выбивки с использованием разупрочняющей добавки при толщине стенки технологической пробы 5 мм уменьшается в 4,1 раза, а при толщине стенки технологической пробы 20 мм – в 7,5 раза. Это характеризует эффективность и целесообразность применения разупрочняющей добавки.

Выводы. Предложенная добавка была рекомендована для использования в технологическом процессе при производстве отливки «Упор передний УП-1» массой 104,5 кг. По результатам опытно-промышленных испытаний получена качественная отливка.

Литература

1. Дибров И.А. О проведении XIII международного съезда литейщиков и международной выставки «Литье - 2017» 19-21 сентября 2017 г., Челябинск/Литейщик России №10, 2017г., с. 7-14.
2. M. Holtzer, R. Dańko, M. Kubecki, S. ŻymankowskaKumon, A. Bobrowski, A. Kmita, M. Górny, 71st World Foundry Congress, Bilbao 19-21 May 2014. – 410p.
- 3 . Yu. Svinoroev, V. Kostrub, O. Klimova New ecological binder materials based on vegetative raw aterials processintg products/Teka commission of motorization and power industry in agriculture Lublin university of technology Volodymyr Dal East-Ukrainian national university of Lugansk, Volume XB, Lubin 2010 - p. 227 – 231.
4. Фалах Мустафа аль Сарайрех Разупрочнители смесей на жидкостекольной основе/ Фалах Мустафа аль Сарайрех, Бэр Р., Свинороев

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «КОРПУС БУКСЫ»

Черепихина Н.П., Шинкарева Т.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Луганский государственный университет имени
Владимира Даля».

В сфере вагоноремонтного производства приоритетным направлением выступает комплексное улучшение технических и эксплуатационных характеристик подвижного состава – увеличение срока службы отремонтированных вагонов, повышение их работоспособности и ресурса до следующего капитального ремонта. Для достижения этих целей особое значение имеет совершенствование производственных процессов, включая внедрение современных технологий восстановления узлов и деталей, оптимизацию организационных мероприятий и ужесточение стандартов контроля качества.

Успешное выполнение этих задач невозможно без модернизации технологических процессов. Особое внимание уделяется автоматизации производственных операций, использованию высокоэффективных материалов и строгому соблюдению технологической документации, что позволяет минимизировать дефекты и максимально продлить межремонтный период вагонов. Кроме того, внедрение передовых практик управления качеством и внедрение системы непрерывного мониторинга процессов обеспечивает стабильность и предсказуемость результатов ремонта.

Корпус буксы является важнейшим элементом ходовых частей вагона, от надёжности отливки во многом зависит безопасность движения поездов.

Целью статьи является анализ технологии изготовления отливки «Корпус буксы» на действующем предприятии и разработке методов контроля, регулирования, диагностики технологического процесса производства и улучшения качества стальных отливок по газифицируемым моделям.

Для получения качественной отливки «Корпус буксы» и других высокоточных отливок из железоуглеродистых сплавов широкой номенклатуры и различного назначения технологии литья по газифицированным моделям использовали следующие методические подходы:

- анализ технологического процесса изготовления стальных отливок «Корпус буксы» и их брака в условиях реального производства ООО «ЛУГЦЕНТРОКУЗ им. С. С. Монятовского»;
- исследование видов брака и обработка данных;
- разработка рекомендаций по выбору основных технологических параметров литья по газифицированным моделям для снижения брака отливок.

Корпус буксы предназначен для размещения элементов буксового узла и смазки. Конструкция корпуса буксы определяется схемой опирания рамы тележки на буксовый узел.

Корпус буксы изготавливается путем отливки из стали марок 15Л, 20Л, 25Л ГОСТ 977–75 с содержанием углерода в марки стали 25Л не более 0,27%, из низколегированной стали по техническим условиям на литые детали вагонов, утвержденным в установленном порядке, и из стали по ГОСТ 22703-77. Отливки корпусов букс подвергаются термической обработке (нормализации или отжигу), удаляются – окалина, пригоревшая формовочная смесь, заусенцы и большие выступы. После этого производится механическая обработка мест, предусмотренных чертежом.

В вагонах применяют корпуса букс двух типов: челюстные – без опор под рессорные комплекты, но с направляющими пазами для челюстей боковой рамы тележки – для грузовых вагонов, бесчелюстные – с опорными кронштейнами под пружины рессорных комплектов – для пассажирских вагонов.

Технологический процесс производства отливок по газифицируемым моделям, который в конце XX в. получил широкое применение в промышленно развитых странах и в настоящее время считается одним из самых перспективных способов литья.

В процессе изучения и анализа [1-2] литье по ЛГМ позволило выявить ряд его достоинств:

- неразъемность модели и отсутствие операции извлечения ее из формы, вследствие чего значительно упрощаются процессы изготовления модели и формы, повышается точность отливки, не образуя характерные дефекты по разьему;
- исключаются из производственного процесса стержневое, формовочное и смесеприготовительное оборудование;
- для формирования моделей применяют сухой кварцевый песок и укрепляют форму вакуумом;
- возможность комплексной автоматизации всего технологического процесса;
- сокращение числа технологических операций и оборудования для финишной обработки отливки;
- использование недорогого и сравнительно простого оснащения; - значительное улучшение условий труда.

Проблема обеспечения качества отливок в условиях современного промышленного производства является актуальной, поскольку позволяет уменьшить себестоимость отливок.

Анализ технологического процесса и, соответственно, исследование видов брака проводилось на всех этапах изготовления отливки «Корпус буксы».

1. Подготовка материала для изготовления газифицируемых моделей.

На этапе подготовки материалов произвести входной контроль поступивших материалов согласно «Перечню основной продукции подлежащей входному контролю в производстве» и «Перечню вспомогательной продукции, подлежащей входному контролю в производстве». Провести радиационный

контроль лома и отходов и контроль на отсутствие взрывоопасных веществ только в покупном ломе согласно СанПиН 2.6.1.993-00 «Гигиенические требования к обеспечению радиационной безопасности при заготовке и реализации металлолома».

2. Подготовка шихтовых и вспомогательных материалов.

Шихтовые материалы:

- лом возвратный углеродистой стали;
- лом возвратный и отходы углеродистой стали от прочих цехов;
- стружка стальная;
- лом возвратный и отходы углеродистой стали от прочих цехов;
- ферросплавы.

Контроль веса ферросплавов и флюсов.

3. Плавка.

Загрузить шихтовые материалы в электродуговую печь, расплавить металлошихту. Контролировать температуру перед выпуском металла. Температура перед выпуском должна быть 1650 – 1670°C.

4. Контроль изготовления пенополистироловой модели.

Определить насыпную массу пенополистирола (каждое поступление)

Проверить поверхности моделей на отсутствие дефектов (выборочно через 15 съёмов – визуально)

Проверить плотность краски АПБ-1ДВ $\rho = 1520 - 1550 \text{ кг/м}^3$

Ареометр АОН – 2 (1780 – 1840 кг/м³; 1840 – 2000 кг/м³)

Контролировать размеры полумодели и проверить модель готовую к покраске.

Не допускается: небрежная зачистка моделей; перекося полумоделей после склеивания; несоответствие размеров; механические повреждения.

5. Проверить кусты готовые к заливке

Не допускается: частичное отслоение противопопригарного покрытия; непрокрашивание моделей; некачественная склейка элементов литниковой системы с моделью; механические повреждения моделей и литниковой системы.

6. Формовка.

Контролировать температуру песка при формовке (не более 60°C) Песок кварцевый 1К1О203 или 1К2О203. Допускается применение песка 1К1О303 ГОСТ 2138 – 91.

7. Выбивка и обрубка.

Контролировать время выдержки отливки в форме 4 – 5 часов.

Проверить отливки на отсутствие дефектов: недоливов, обвалов, сквозных раковин, трещин, неслитин – визуально 100%.

8. После обрубки, очистки отливок в дробеструйной камере контроль размеров отливки штангенциркулем и щупом для измерения глубины дефектов.

Дефекты, подлежащие исправлению отмечать мелом. Отливки с неисправимыми дефектами – браковать, отметить красной краской на горловине и поместить в изолятор брака.

Не допускаются: пригар; наросты и приливы.

Микроструктура должна быть мелкозернистой и соответствовать методике «Методика и образцы микроструктур для оценки термообработку по одному режиму».

9. Термическая обработка отливки.

После изотермического отжига проконтролировать и испытать 10% отливок в месте зачистки. Измерить диаметр отпечатка 10% отливок, $d_{отп} = 4,5...5,3\text{мм}$ При неудовлетворительных показателях твердости ($d_{отп} \leq 4,5$), производить операцию отпуск.

На этапе операции «Отпуск» проводить контроль температуры, время нагрева и выдержки. Общее время 5-7 часов.

10. Механические испытания.

В таблице 1 приведены механические свойства (твердость, ударная вязкость, испытания на изгиб), которые контролировать по результатам испытаний испытательного центра на каждую плавку деталей, прошедших качества термическую обработку.

Таблица 1. Механические свойства отливок

Марка стали	σв, кгс/мм ²	σт, кгс/мм ²	δ, %	KCU, кгс м/мм ²
15Л	≥40	≥20	≥24	≥5
20Л	≥42	≥22	≥22	≥5
25Л	≥45	≥24	≥19	≥4

В литейных цехах с различным техническим уровнем и культурой производства брак отливок колеблется от 1 до 10 %, а по ряду наименований сложных отливок может достигать 50 - 70 %. Поэтому вопросам выявления и устранения брака уделяется большое внимание.

Вывод. Проведенный анализ технологического процесса изготовления отливки «Корпус буксы» показал, что на всех операциях необходим рекомендованный контроль, а также важно проводить регулярный контроль оборудования и процессов производства.

Литература:

1. Григорьев В.М. Литье по выжигаемым моделям: Учебное пособие для студентов - Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002.
2. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки: В 2 ч. М.: Машиностроение, 1976. Ч. 1. 328 с.; 1979. Ч. 2. 335 с.
3. Воронин Ю.Ф. Повышения качества литья. Системный подход. - М.: Машиностроение -1, 2007. — 264 с.
4. Бобровников Г. Н., Клебанов А. И. Прогнозирование в управлении техническим уровнем и качеством продукции: Учеб. пособие. – М.: Издательство стандартов. – 1984. - 232 с.
5. Воздвиженский В. М. и др. Контроль качества отливок: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технологии литейного производства». – М.: Машиностроение. - 1990. – 240 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ЧУГУНА ИЗ ГЕМАТИТОВОЙ РУДЫ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ В ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Медведев И.И., Хворостов Д.В., Пасечник С.Ю., Симоненко В.И.
Донецкий национальный технический университет

Аннотация

Исследованы особенности выплавки чугуна из гематитовой руды с большим содержанием кремния (содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 51\%$, $\text{SiO}_2 \approx 18\%$) в тигельной электрошлаковой печи с использованием антрацита в качестве восстановителя. Показано, что процесс позволяет получать чугун с высоким содержанием углерода и шлак комплексного состава. Рассчитан и уточнен в опытных плавках на лабораторной установке необходимый состав шихты, режимы плавки и материальный баланс. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации лабораторных и полупромышленных процессов восстановительной плавки железных руд в тигельных электрошлаковых печах.

Ключевые слова: гематитовая руда, электрошлаковая тигельная печь, восстановление углеродом, антрацит, чугун, шлак, тигельная плавка.

Введение

Гематит (Fe_2O_3) — один из основных железорудных минералов. Восстановительная плавка гематитовых руд углеродосодержащими материалами (антрацит, кокс, уголь) является классическим пирометаллургическим процессом получения чугуна в доменной печи. [1]

Подготовка железной руды для доменного процесса

Перед загрузкой в доменную печь железная руда проходит обязательную подготовку. Основная цель — повысить содержание железа, улучшить физико-механические свойства шихты (прочность, газопроницаемость), снизить содержание вредных примесей и обеспечить эффективное протекание восстановительных процессов. Основные этапы подготовки: обогащение (повышение содержания железа); дробление и измельчение руды; сепарация (магнитная, гравитационная, флотация); агломерация, окомкование или брикетирование.

Однако традиционное получение восстановленного углеродсодержащим материалом железа в доменной печи многостадийный и затратный процесс, особенно если в составе руды большое количество кремнезема.

Целью настоящей работы является поиск более простого процесса восстановления, практически без подготовки руды к плавке и получению кроме чугуна так же ферросилиция, так как в исходном сырье содержание кремния около 18 процентов. [2]

Для этого было предложено использовать жидкофазное восстановление в печах, например с использованием руднотермического процесса.

В данной работе предлагается использовать в качестве лабораторной рудно-термической печи (РТП) электрошлаковую тигельную печь (ЭШТП) [2].

Печь работает по принципу электрошлакового переплава, где тепло выделяется в шлаковой ванне при прохождении электрического тока между электродами и металлической ванной. [3]



Рисунок 1 Электрошлаковая тигельная печь

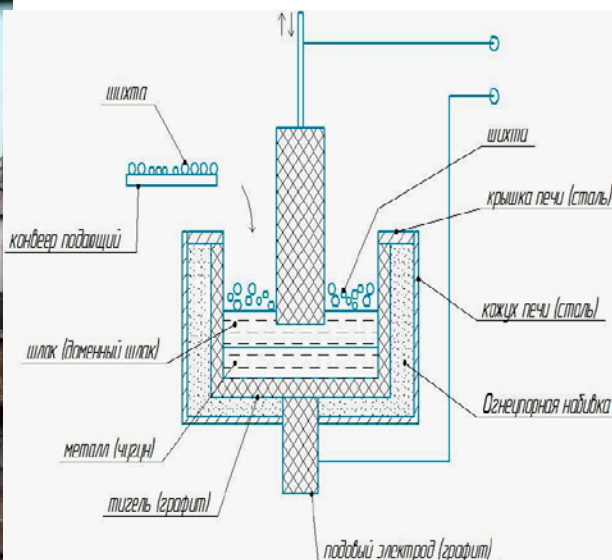


Рисунок 2 Схема лабораторной электрошлаковой тигельной печи

Для использования таких печей для восстановления железа из руд необходимо подобрать соответствующую шлаковую систему, которая должна: обеспечить старт процесса, его стабильное протекание, не вносить много примесей при проведении восстановления руды в жидкой фазе.

Использование промышленных флюсов на основе фторидов очень дорого, поэтому наиболее близки к искомому флюсу является недорогой, практически отход производства доменной плавки - доменный шлак.

Доменный шлак имеет оптимальный многокомпонентный состав ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$), близкий к эвтектическим составам с относительно низкой температурой плавления (обычно 1300–1450 °С) и хорошей жидкотекучестью в рабочем диапазоне температур. Это обеспечивает простой, так называемый «твердый старт» процесса: шлак быстро переходит в жидкую фазу, смачивает шихту, улучшает контакт восстановителя с рудой и способствует началу восстановления в жидкой фазе.

Высокая буферная ёмкость по основности и вязкости позволяет поддерживать нужные физико-химические свойства шлака даже при колебаниях состава руды или добавок; хорошая разница плотностей с металлом обеспечивает эффективное разделение фаз.

Низкая окисленность и присутствие остаточного FeO/CaO способствуют

дальнейшему восстановлению железа из руды именно в жидком шлаке (жидкофазное восстановление идёт быстрее, чем в твёрдой фазе).

Расчет необходимого состава шихты с углеродным восстановителем

Основная реакция восстановления: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}$

Процесс сопровождается образованием шлака из пустой породы руды и флюсов (в данном случае — доменного шлака). Целью работы являлось определение практических параметров шихты, расхода восстановителя, выхода продуктов и состава получаемого чугуна на основе лабораторных плавов.

Исходные данные:

Масса руды: 100 кг

Содержание гематита (Fe_2O_3): 51 %

Восстановитель: антрацит (содержание углерода ≈ 92 %)

Расчёт (теоретический):

Масса $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 100 \times 0,51 = 51$ кг.

Молярная масса $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 160$ г/моль, $\text{C} = 12$ г/моль.

По стехиометрии требуется 3 моль C на 1 моль Fe_2O_3 .

Теоретическая масса чистого углерода $\approx 11,475$ кг.

С учётом 92 % C в антраците: $\approx 12,47$ кг.

С практическим коэффициентом избытка 1,3 (неполнота реакции, потери, примеси): $\approx 16,2$ кг антрацита на 100 кг руды. [4]

Материалы и методика эксперимента

Использовалась лабораторная ЭШТП с графитовым электродом и графитовым тиглем (см. рис 2).

Порядок проведения плавов:

Шихта: гематит 5 кг; уголь (дроблёный, фракция 0-3 мм) - 1 кг; доменный шлак 1кг. *Ход плавов:* в тигель загружают немного коксика, закорачивают на него графитовый электрод и засыпают порцию доменного шлака, далее подают напряжение — при этом возбуждается электрическая дуга между графитовым электродом и коксиком, которая и расплавляет доменный шлак. По мере добавки в расплавленный шлак порций доменного флюса дуговой процесс прекращается и переходит в шлаковый режим. При прохождении тока через слой расплавленного шлака, происходит его нагрев до температуры 1800–2000 °С. После наведения шлаковой ванны на доменном шлаке прогревают тигель до температуры 1000 град С и начинают вводить порции шихты. Порционный ввод шихты необходим с целью предотвращения бурного «кипения» жидкой части за счет выделения в процессе восстановления железа CO_2 . После расплавления всей шихты, поддерживают нагрев жидкой шлаковой ванны до полного прекращения «кипения». После этого, выключают напряжение и извлекают графитовый электрод из тигля, а последний поворачивают на 100 град в сторону разливочного носика и сливают получившийся расплав в заранее подготовленной кокиль (см. рис 3). Баланс плавов показан в таблице 1.

Таблица 1 Данные плавки по жидкофазному восстановлению гематита в ЭШТП

Шихта начальная		Вес, кг
Гематит+уголь		2.700
Доменный шлак		1.000
Остаток шихты		0.000
Доменный шлак		0.630
Итого израсходовано		
Доменный шлак		1.370
Гематит+уголь		2.700
Выход продукта		
Чугун		0.770
Длительность процесса	Ток (А)/напряжение (В)	Мин/сек
Старт+расплавление доменного шлака	2000...1000/32	4 мин 10 сек
Загрузка и расплавление руды	800/32	18 мин
Выдержка расплава	800/32	4 мин
Общее время плавки	26 мин 10 сек	
Ток средний	900 А	
Напряжение	32 В	
Расход ЭЛ-ЭН на плавку	23 кВт	
Расход эл.энергии на 1 кг чугуна	29.87 кВт	

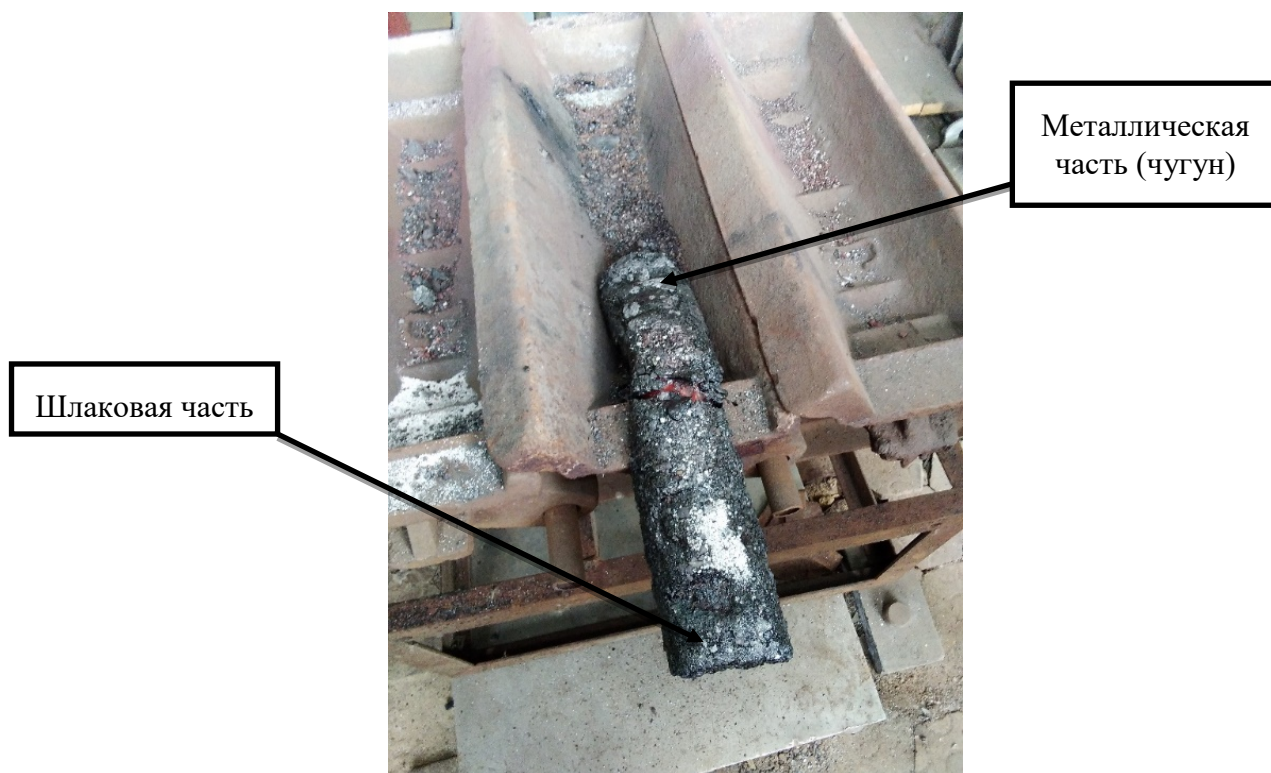
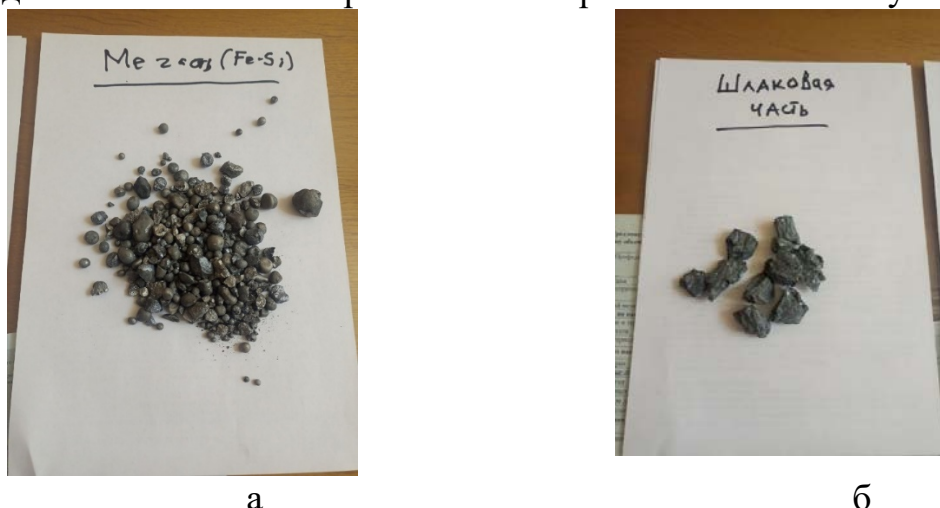


Рисунок 3 Полученные продукты восстановления гематитовой руды

После остывания проводили отделение металлической части от шлаковой методами измельчения и грохочения. На рис 4 показаны полученные продукты.



а б
Рисунок 4 Продукты восстановления гематитовой руды:
а-металлическая часть; б-шлаковая часть

Химический анализ продуктов плавов (таблица 2) определяли рентгенофлуоресцентным анализатором металлов TrueXR [5].

Таблица 2 Состав чугуна и шлака в полученном продукте

Состав чугуна	Содержание в %	Состав шлака	Содержание в %
Zn	0.018	P	0.136
Ni	0.054	S	0.174
S	0.228	Zr	0.796
Cu	0.544	Al	4.093
Fe	99.146	Mn	6.122
-	-	Si	12.145
-	-	Fe	76.524

Выводы

1. Результаты экспериментов показали эффективность жидкофазного восстановления гематитовой руды антрацитом в тигельной электрошлаковой печи.

2. Применение коксика на стартовой операции процесса дает избыток восстановителя (коэффициент 1,2–1,5) необходим из-за неполноты реакции, образования CO/CO₂, потерь и взаимодействия с пустой породой.

3. Использование доменного шлака в качестве флюса способствует стабильному протеканию электрошлакового процесса во время восстановления, поддержанию заданной температуры процесса и хорошему разделению фаз - металл/шлак по плотности.

4. Полученный чугун имеет высокое содержание железа и может использоваться как шихта для дальнейшей переработки в сталь или как товарный продукт.

5. Шлак содержит остаточное железо, кремний и компоненты пустой породы- его можно использовать для получения ферросилиция.

Литература:

1. Технологии прямого восстановления с получением гранулированного железа [Электронный ресурс]. — URL: (дата обращения: ДД.ММ.ГГГГ). Теоретические основы подготовки железорудного сырья к доменной плавке : учебное пособие для обучающихся образовательных учреждений высшего образования / И. М. Мищенко, Я. Ю. Асламова, А. В. Кузин, В. В. Кочура ; ФГБОУ ВО "ДонНТУ". - 4 Мб. - Донецк : ДонНТУ, 2025. - 1 файл. - Систем. требования: просмотрщик PDF-файлов. <http://ed.donntu.ru/books/25/cd11077.pdf>
2. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / [Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын и др.]; Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара; АН УССР, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. - Киев : Наук. думка, 1988. - 213,[1] с. : ил.; 25 см.; ISBN 5-12-009380-9
3. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Электрометаллургия специальных сталей", с использованием компьютерной модели "ОРАКУЛ" для расчетов процессов выплавки стали и ферросплавов [Электронный ресурс] : направление подготовки: 22.03.02 "Металлургия" профиль: "Электрометаллургия стали" для обучающихся очной и заочной форм обучения / ГОУВПО "ДОННТУ", Каф. электрометаллургии ; сост. А. А. Троянский. - 385 Кб. - Донецк : ГОУВПО "ДОННТУ", 2021. - 1 файл. - Систем. требования: просмотрщик PDF-файлов. <http://ed.donntu.ru/books/21/m7392.pdf>
4. Рентгенофлуоресцентный анализатор металлов TrueXR : официальный сайт [Электронный ресурс] / LANScientific Co., Ltd. — Электрон. дан. — [Китай], [2026]. — URL: (дата обращения: 12.05.2026).

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПО ВЫЖИГАЕМЫМ ПОЛИМЕРНЫМ МОДЕЛЯМ

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

В современном литейном производстве всё большее распространение получает комбинация аддитивных технологий и классического литья по выжигаемым моделям. Традиционно для таких моделей используется воск, однако 3D-печать термопластами позволяет значительно ускорить процесс изготовления сложных деталей. В данной работе исследуется возможность использования пластика PETG с экстремально низким процентом заполнения — всего 1% — в качестве выжигаемой модели для последующей заливки расплавленным алюминием. Основная гипотеза заключается в том, что даже пустотелая оболочка без массивного внутреннего заполнения способна обеспечить получение качественной отливки. На рисунке 1 показана отпечатанная на 3D принтере модель отливки.



Рисунок 1 – Напечатанная на 3D принтере модель отливки

В ходе эксперимента была изготовлена пластиковая модель методом FDM-печати из полимера PETG. Деталь имеет законченную геометрию и внешне не отличается от напечатанной с высоким заполнением [1]. Однако ключевая особенность скрыта внутри — параметры печати были заданы таким образом,

что заполнение составило лишь 1%, то есть, напечатана только внешняя оболочка толщиной в 1 мм, а внутренний объём остаётся пустым. Благодаря этому масса детали составила всего 2 грамма, что значительно меньше, чем при традиционном подходе с заполнением 50–100%. Такая лёгкость модели достигается без потери внешней формы, поскольку периметры и верхние слои обеспечивают необходимую жёсткость для последующей формовки [2].

После получения пластиковой модели был выполнен следующий этап — формовка в песчано-глинистую смесь (ПГС). Модель отливки с литниковыми каналами была заформована по традиционному методу в 2-х опоках в ПГС. На рисунке 2 показана литейная форма в сборе.



Рисунок 2 – Литейная форма в сборе

Расплавленный алюминиевый сплав АЛ8 (Al 89–90,5 %, Mg 9,5–10 %, Fe до 0,3 %, Si до 0,3 %, Zr до 0,2 %, Ti до 0,07 %, Be до 0,07 %, Mn до 0,1 %, Cu до 0,1 %, Zn до 0,1 %) заливался непосредственно в форму после формовки и сушки на воздухе в течении 24 часов.

При контакте с жидким металлом, температура которого составляла 700–730°C, пластиковая модель из PETG расплавлялась и разлагалась. Тонкая оболочка модели (1% заполнения) создает необходимую конфигурацию отливки и по мере газифицирования создает антипригарное покрытие из остатков углеродной массы пластика PETG (сополиэстер на основе терефталевой кислоты, этиленгликоля и циклогександиметанола). Образовавшиеся газообразные продукты выводятся через специально организованные вентиляционные каналы [3].

Расплав под действием гравитации и давления столба металла заполняет полость, ранее занятую пластиковой моделью. На рисунке 3 представлена полученная отливка после ее разрезки для контроля качества по газовой пористости.



Рисунок 3 – Отливка из алюминиевого сплава АЛ8

После извлечения из формы и удаления литниковой системы проводили визуальный осмотр, который показал, что полностью воспроизведена геометрия исходной пластиковой модели — все внешние поверхности, углы и мелкие элементы детали отлиты без искажений, отливка плотная, без раковин, недоливов и газовых включений. Это доказывает, что для качественной заливки достаточно лишь внешней оболочки модели, а массивное внутреннее заполнение не требуется [4].

Сравнивая полученный результат с традиционным подходом (использование моделей с заполнением 50–100%), можно выделить несколько преимуществ. Во-первых, расход пластика сокращается более чем в 10 раз — с типичных 20–50 граммов до 2 граммов на деталь. Во-вторых, время 3D-печати уменьшается с нескольких часов до 15–20 минут. В-третьих, ускорение выжига с 6 часов до 2 часов позволяет быстрее проводить цикл литья. При этом качество итоговой алюминиевой отливки не уступает полученной по традиционной методике.

Таким образом, проведенный эксперимент наглядно демонстрирует, что литьё по выжигаемым 3D-моделям из PETG может успешно выполняться с заполнением всего 1% (фактически — только оболочка) при массе модели 2 грамма. Полученная алюминиевая отливка имеет плотную структуру без

дефектов, что подтверждает достаточность внешней оболочки для качественного заполнения формы. Рекомендуется применять данный подход для быстрого и экономичного получения металлических прототипов различных форм, особенно в условиях, когда важны скорость и минимальный расход материалов.

Литература

1. 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.
2. Шуляк, В.С. Литье по газифицируемым моделям / В.С. Шуляк // Санкт-Петербург : Профессионал, 2007. — 405 с.
3. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении : учебное пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. - Санкт-Петербург : Изд-во СПб. политехнического ун-та, 2013. — 222 с. - (Профессиональное образование).
4. Десницкий, В.В. Обеспечение плотного металла в тонкостенной отливке при литье по выплавляемым моделям / В.В. Десницкий, Л.В. Десницкая, И.А. Матвеев // Литейное производство. — 2021. — №2. — С. 23-27.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ



ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СЛЯБОВ 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. При непрерывной разливке ширина слябов соответствует ширине кристаллизатора. Следовательно, на каждую ширину готовой полосы требуется свой кристаллизатор, что обуславливает необходимость наличия большого числа кристаллизаторов и снижения числа плавов, разливаемых по технологии «плавка на плавку». Это приводит к снижению производительности машин непрерывного литья (МНЛЗ), а также к повышению технологической обрезки.

Сокращение градации по ширине при прокатке полос осуществляют, как правило, путем редуцирования слябов. Уменьшают их ширину путем предварительного обжатия в вертикальных валках или прессах. Эти способы прокатки хорошо известны и изучены.

Как альтернативу редуцированию при прокатке применяют раздачу (увеличение) ширины исходного сляба. В работе [1] 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. Данный способ позволяет достигать большего уширения раската по сравнению с традиционной прокаткой [2, 3], однако параметры формоизменения раскатов мало изучены и требуют дальнейших исследований.

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

Проведены исследования процесса раздачи сляба в комплекте прокатных валков с применением метода конечно-элементного моделирования в среде DEFORM 3D. Верхний валок выполнен с двумя кольцевыми выступами диаметром 55 мм и шириной 20 мм симметрично оси прокатки. Нижний валок представляет собой гладкую бочку диаметром 55 мм. Размеры математически моделируемого сляба 10x55x100 мм, материал – свинец. Моделирование прокатки проведено при комнатной температуре, без смазки, с зазором между валками в каждом проходе 7 мм. Прокатку осуществили за три прохода в одном направлении путем поэтапного обжатия 9,2 мм по ширине от краевых участков к центральному.

Внешний вид раскатов сляба в плане при поэтапной раздаче ширины показан на рисунке 1.

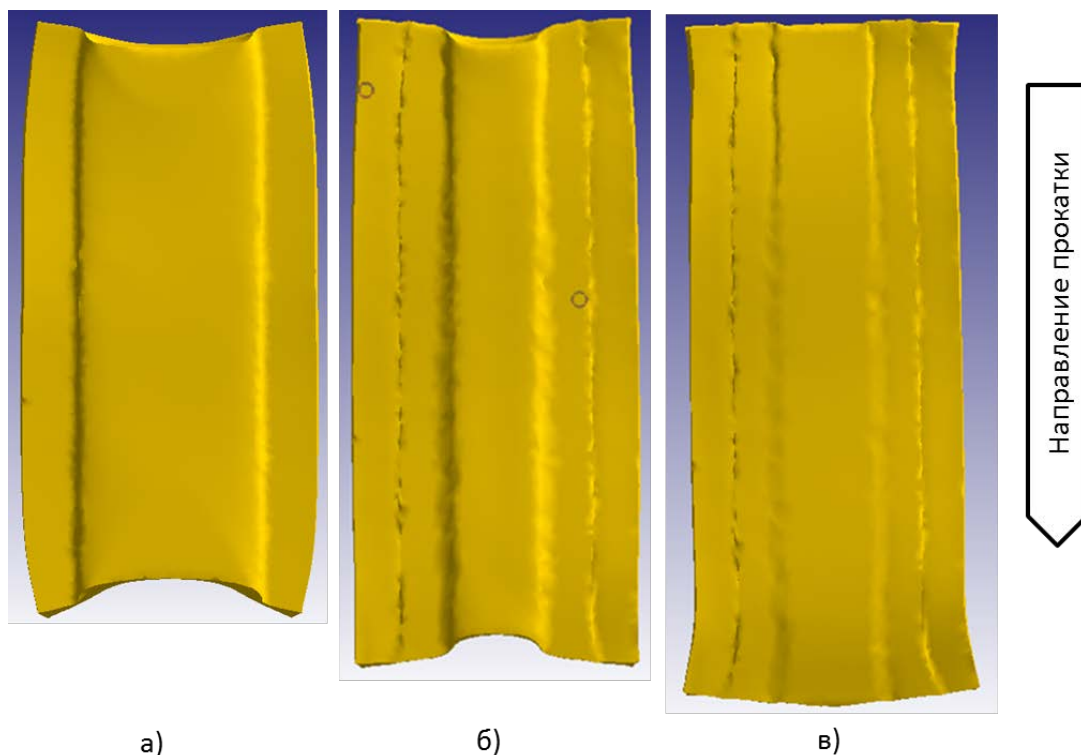


Рисунок 1 – Внешний вид раскатов сляба в плане при поэтапной раздаче ширины: а, б, в – соответственно после 1-го, 2-го и 3-го проходов

Из рисунка 1 видно, что в процессе прокатки основным искажениям подвергаются передний и задний концы раската сляба. Поэтому, основные параметры, которые исследовались в процессе моделирования прокатки сляба выбрали следующие (рисунок 2):

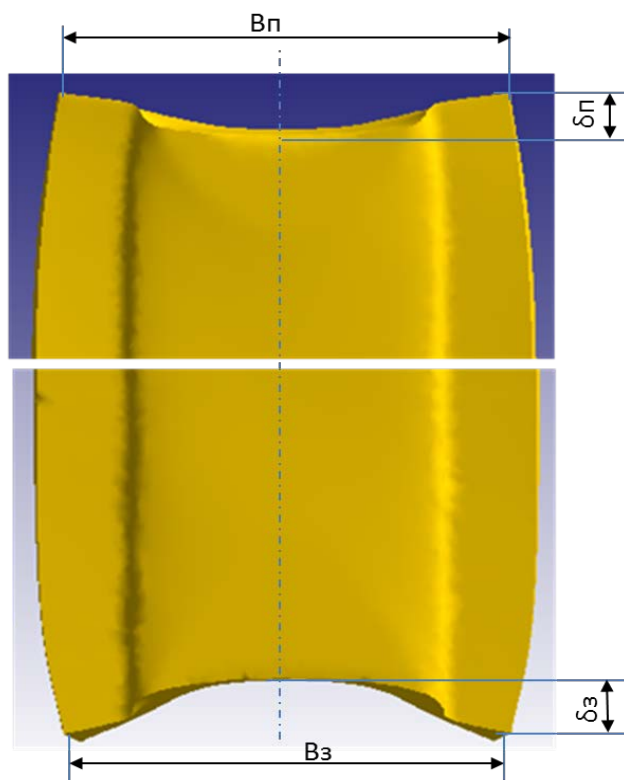


Рисунок 2 – Основные параметры формы в плане раската после прокатки

- вогнутость переднего δ_p и заднего δ_z концов раската;
- ширина переднего V_p и заднего V_z концов раската.

Параметры формы в плане исследовали в динамике в процессе прокатки по проходам путем фиксирования их по мере продвижения раската в валках.

Для исследования наибольший интерес представляют параметры формоизменения раскатов сляба для последнего (3-его) прохода при поэтапной раздачи ширины.

На рисунке 3 показано изменение вогнутости переднего δ_p и заднего δ_z концов раската в процессе прокатки в 3-ем проходе, на рисунке 4 изменение ширины переднего V_p и заднего V_z концов раската в процессе прокатки в 3-ем проходе.

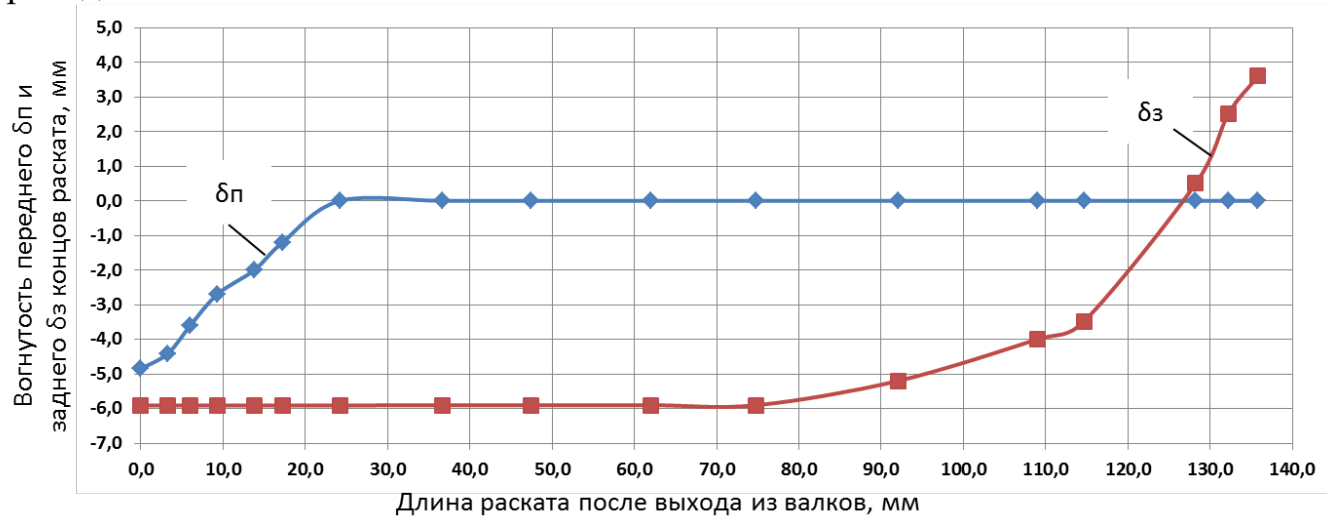


Рисунок 3 – Изменение вогнутости переднего δ_p и заднего δ_z концов раската в процессе прокатки в 3-ем проходе

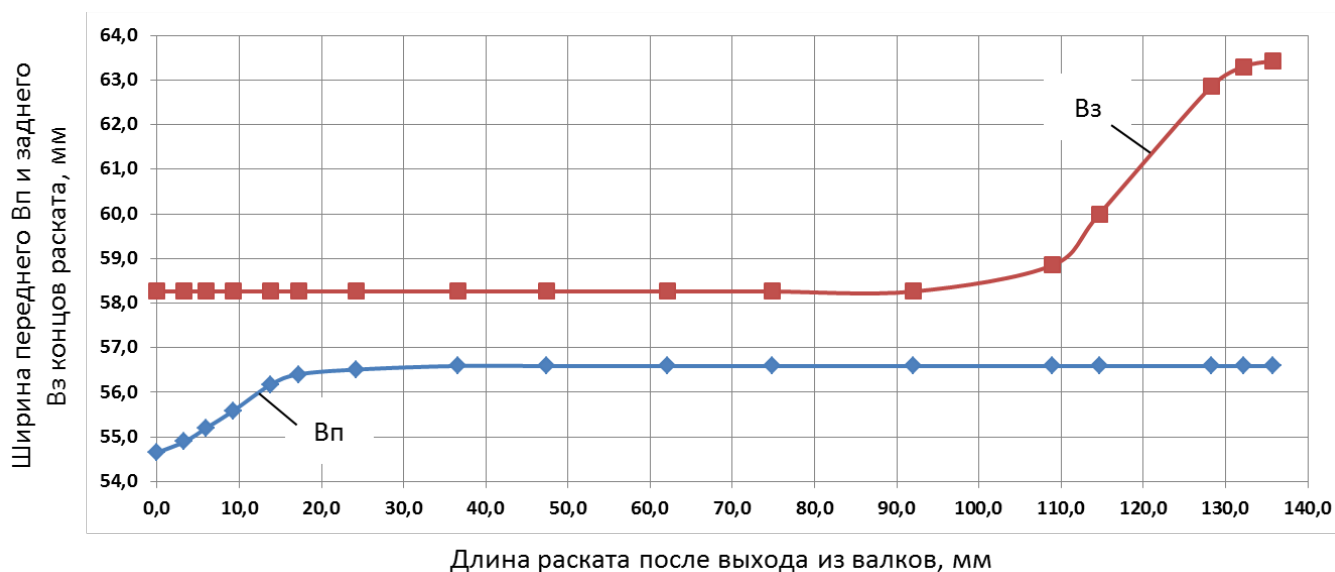


Рисунок 4 – Изменение ширины переднего V_p и заднего V_z концов раската в процессе прокатки в 3-ем проходе

Из рисунка 3 видно, что исходная вогнутость переднего конца на 1,0 мм меньше, чем заднего, то есть это та вогнутость, которая была получена после прокатки во 2-ом проходе за счет утяжки переднего конца. Далее в 3-ем проходе, за счет деформации центрального участка вогнутость переднего конца уменьшается и после прокатки раската длиной 17,0-18,0 мм практически полностью устраняется. Формирование вогнутости заднего конца происходит следующим образом: ближе к окончанию прокатки вогнутость начинает уменьшаться, далее становится равной нулю и после прокатки приобретает выпуклость 3,6 мм.

Из рисунка 4 видно, что исходная ширина переднего конца на 3,5 мм меньше, чем заднего, то есть это та ширина, которая была получена после прокатки во 2-ом проходе. Далее в 3-ем проходе, за счет деформации центрального участка ширина переднего конца увеличивается и после прокатки раската длиной 17,0-18,0 мм не изменяется, но остается меньше, чем ширина заднего конца на 1,5-2,0 мм. Формирование ширины заднего конца происходит следующим образом: ближе к окончанию прокатки ширина начинает увеличиваться и далее после прокатки приобретает некоторую веерообразность.

Вывод.

1. На основе конечно-элементного моделирования раздачи ширины сляба при поэтапном деформировании участков от крайних участков к центральному, показана динамика изменения параметров формоизменения в последнем проходе.

2. Показано, что изменение вогнутости (выпуклости) и ширины концов раската влияют друг на друга и происходят практически на одной и той же длине проката.

Литература:

1. 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.

2. 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.

3. Глазунов, А.В. Моделирование формоизменения раскатов при поэтапной раздаче ширины / А.В. Глазунов, С.В. Закарлюка // II Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых». – Донецк: ДонНТУ, 2025. – С. 77-80.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС К ПОТЕРЕ ПЛОСКОСТНОСТИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Гордиенко В.М., Закарлюка С.В.

Донецкий национальный технический университет

Плоскостность полос и листов является одной из характеристик точности геометрии листовой стали и одним из главных показателей ее технологической пригодности, стабильности производства при обработке в непрерывных агрегатах.

Различают множество видов неплоскостности листов и полос, в том числе: волнистость, коробоватость, одновременное наличие коробоватости и волнистости, односторонняя волнистость, локальная, несимметричная и др. [1].

Механизм возникновения неплоскостности раската, как известно, объясняется неравномерностью его вытяжек в различных продольных сечениях по ширине полосы, что приводит к появлению дополнительных напряжений. В зонах повышенного обжатия возникают напряжения сжатия, а в менее обжатых частях полосы – напряжения растяжения [2-4].

Если дополнительные напряжения сжатия превышают некоторую критическую величину, то происходит потеря плоскостности листа в виде волнистости, коробоватости и других видов этого дефекта, что снижает качество проката, стабильность производства.

Устойчивость полосы к потере плоской формы тем выше, чем выше критические напряжения участка полосы при прочих равных условиях. Из теории расчета гибких пластин [5] известна зависимость для расчета критического напряжения сжатия, при котором пластина теряет устойчивость.

В настоящее время имеется достаточно много способов и устройств для улучшения плоскостности листового проката. Однако большая часть из них основана в основном на снижении неравномерности вытяжки по ширине полос и, соответственно, остаточных сжимающих напряжений. Имеется ряд работ, основанных на повышении критических напряжений путем дробления деформаций в плоскости полосы одновременно вдоль и поперек проката [6-7]. При этом осуществление реализации такой схемы прокатки, потребует достаточно сложную профилировку прокатных валков. Имеется более простой вариант дробления деформаций только по ширине прокатываемой полосы [8]. Однако эти исследования основывались на экспериментальных данных для случая холодной прокатки тонкой полосы.

При этом представляет интерес использования принципа дробления деформаций и при горячей прокатке тонких полос и требует дальнейшего совершенствования и исследований.

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 сжимающие 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 [5] 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;

$\kappa_2 = \frac{\pi^2 E}{12(1-\gamma^2)}$ – показатель, зависящий от упругих свойств пластины (модуля упругости E и коэффициента Пуассона γ).

Из формулы (2) следует, что существенно 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 по ширине полосы.

Целью настоящей работы является экспериментальные исследования подтверждающие, что дробление деформаций по ширине горячекатанной полосы повышает ее устойчивость к потере плоской формы.

С применением рассмотренной выше схемы дробления деформаций при горячей прокатке был проведен лабораторный эксперимент. В качестве материала, моделирующего горячую прокатку, был выбран свинец.

Прокатку опытных образцов толщиной 0,67-1,10 мм, шириной 90-91 мм проводили на лабораторном стане дуо 100 (диаметр валков 100 мм, длина бочки валков 170 мм). Прокатку осуществляли без смазки и натяжения. По середине вдоль всей полосы делали утолщение путем наклеивания свинцовых полосок толщиной 0,10 мм, шириной 35,0-36,0 мм. Такое утолщение при обычной прокатке приводит к образованию коробоватости. Дробление деформаций по ширине свинцовых полос моделировали путем наклеивания бумажных полосок различной толщины и ширины на часть длины опытной свинцовой полосы.

Для исследования влияния дробления деформаций по ширине полосы на ее плоскостность прокатали четыре опытных образца. Вытяжка образцов после прокатки составила $\mu=1,08-1,19$.

С использованием первых трех образцов (№1-№3) исследовали устойчивость полосы к потере плоской формы при дроблении деформаций путем наклеивания бумажных полосок параллельно кромке.

Схема образца №1 с полосчатым расположением участков неравномерной деформации до прокатки приведен на рисунке 1,а. Внешний вид образца №1 после прокатки приведен на рисунке 1,б.

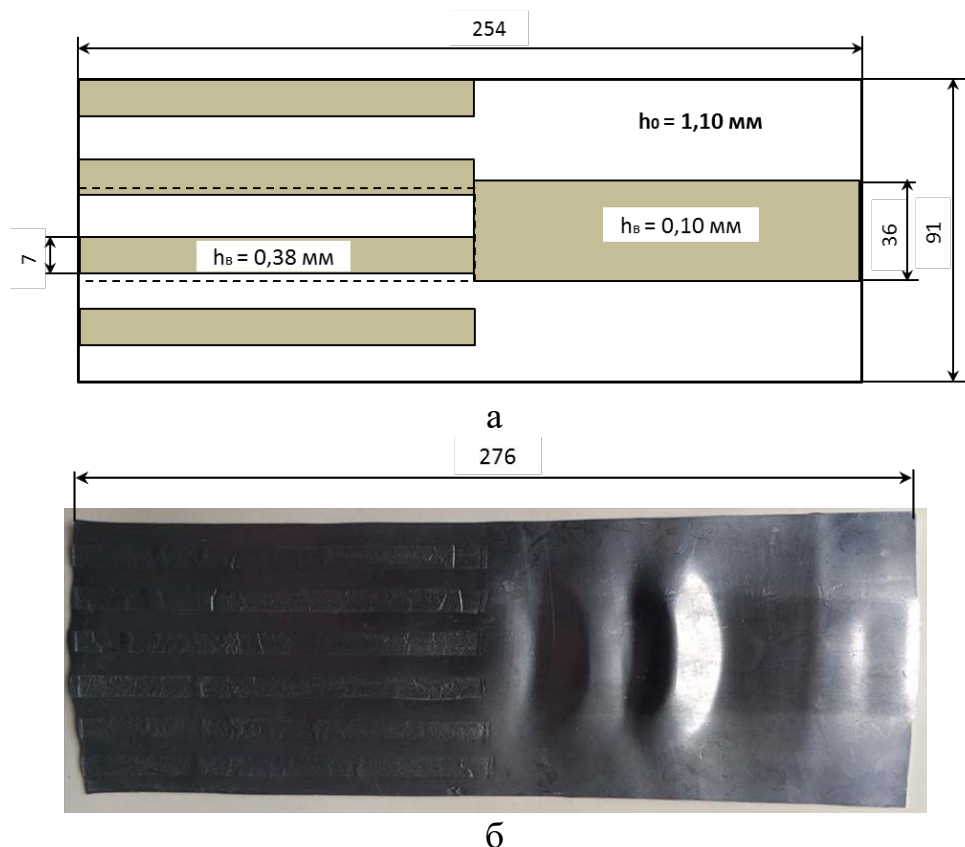


Рисунок 1 - Образец опытной свинцовой полосы №1:
 а - схема образца с дроблением деформации по ширине полосы;
 б - внешний вид образца после прокатки

Из рис. 1 видно, что на участке полосы, прокатанного по традиционной технологии, имеется коробоватость (за счет предварительно созданного посередине утолщения с помощью свинцовой фольги). На участке полосы с с дроблением деформации (за счет наклеенных полосок бумаги шириной 7,0 и толщиной 0,38 мм) происходит стабилизация плоскостности, несмотря на то, что на этом участке проката также было создано утолщение посередине.

Схема образца №2 с полосчатым расположением участков неравномерной деформации с разной шириной полосок (7, 13, 20 мм) до прокатки приведен на рисунке 2,а. Внешний вид образца №2 после прокатки приведен на рисунке 2,б.

Из рис. 2 видно, что на участке полосы, прокатанного по традиционной технологии, имеется коробоватость (за счет предварительно созданного посередине утолщения с помощью свинцовой фольги). На участке полосы с с дроблением деформации (за счет наклеенных полосок бумаги шириной 7,0 и 13,0 мм) происходит стабилизация плоскостности. При ширине полосок 20,0 мм образуется «локальная» неплоскостность.

Схема образца №3 с полосчатым расположением участков неравномерной деформации с разной толщиной полосок (0,76, 0,38, 0,10 мм) с шириной 9,0 мм до прокатки приведен на рисунке 3,а. Внешний вид образца №3 после прокатки приведен на рисунке 3,б.

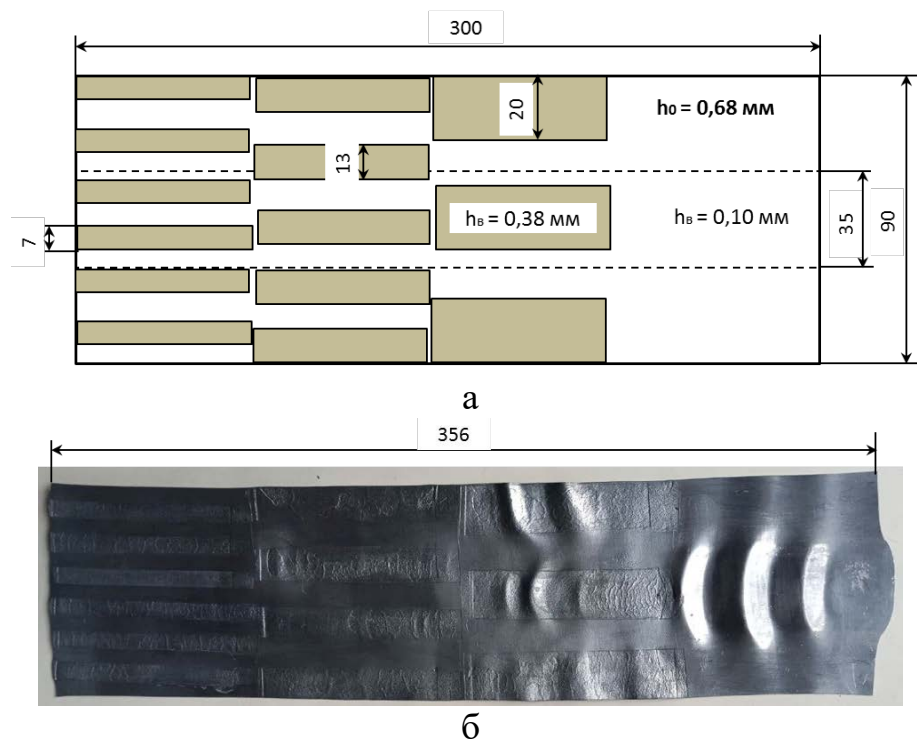


Рисунок 2 - Образец опытной свинцовой полосы №2:
а - схема образца с дроблением деформации по ширине полосы (ширина полосок 7, 13 и 20 мм); б - внешний вид образца после прокатки

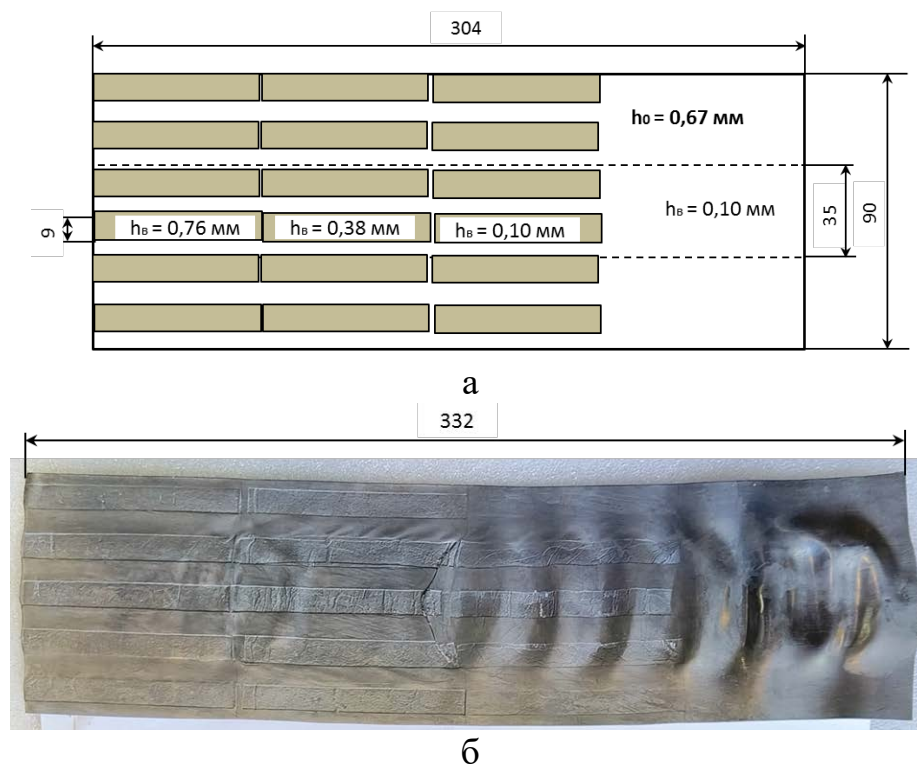


Рисунок 3 - Образец опытной свинцовой полосы №3
а - схема образца с дроблением деформации по ширине полосы с разной толщиной полосок, б - внешний вид образца после прокатки

Из рис. 3 видно, что на участке полосы, прокатанного по традиционной

технологии, имеется коробоватость (средняя высота волны 5, мм, период – 25 мм). На участке полосы с дроблением деформации (за счет наклеенных полосок бумаги толщиной 0,76 и 0,38 мм) происходит стабилизация плоскостности. При меньшей толщине полосок 0,10 мм неплоскостность в виде коробоватости не устраняется.

Для образца №4 исследовали эффективность подавления исходной неплоскостности полосы при дроблении деформаций с использованием методики описанной выше.

Образец №4 предварительно был прокатан с разнотолщинностью для получения коробоватости. На коробоватую полосу были наклеены полоски шириной 9,0 мм с толщиной 0,76, 0,38 и 0,10 мм. Внешний вид коробоватого образца до прокатки показан на рисунке 4,а, схема расположения участков до прокатки приведена на рисунке 4,б после прокатки приведена на рисунке 4,в.

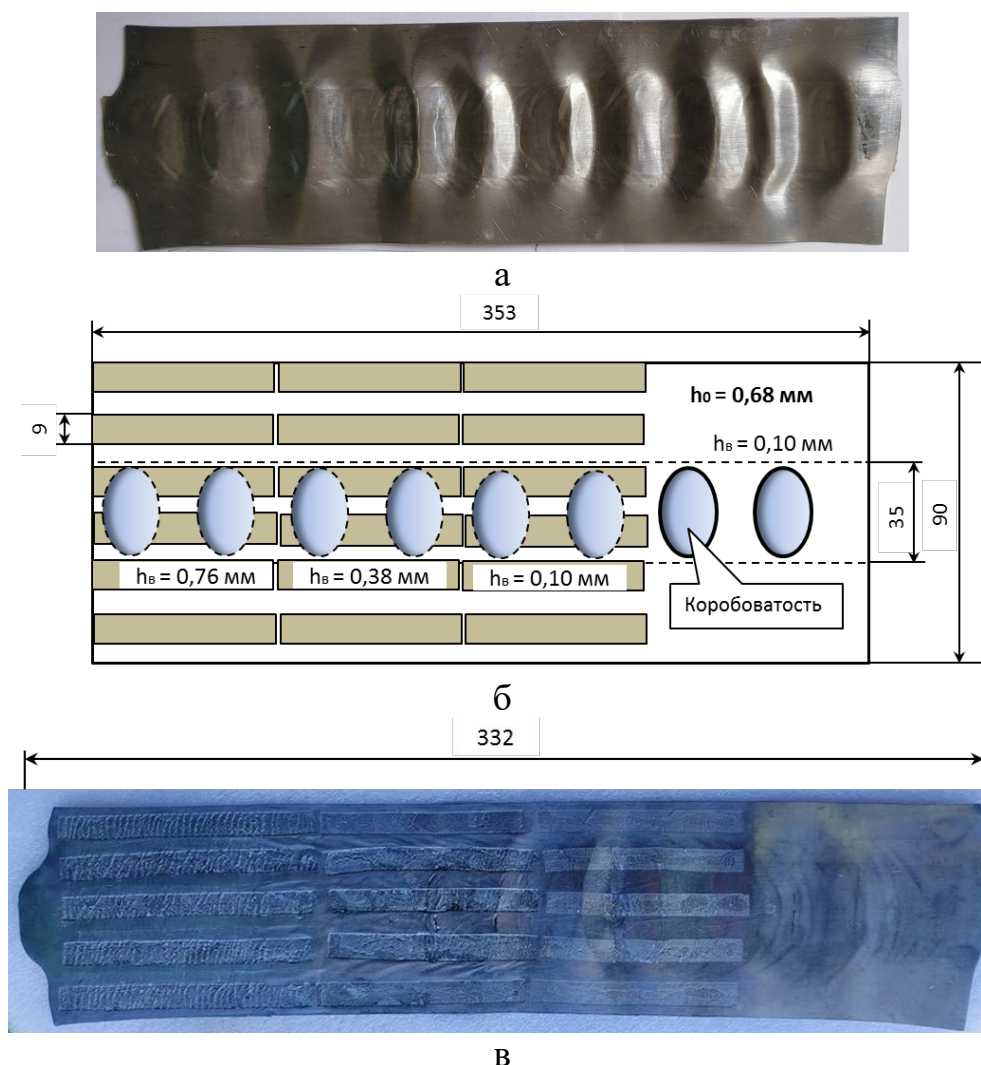


Рисунок 4 - Образец опытной свинцовой полосы №4

а - внешний вид исходного коробоватого образца до прокатки;
б - схема образца с дроблением деформации по ширине полосы (толщина полосок 0,76, 0,38 и 0,10 мм); в - внешний вид образца после прокатки

Из рис. 4 видно, что на участке полосы, прокатанного по традиционной технологии и с толщиной полосок 0,1 мм имеется коробоватость (средняя высота волны 5, мм, период – 25 мм). На участке полосы с дроблением деформации (за счет наклеенных полосок бумаги толщиной 0,76 и 0,38 мм) происходит «подавление» неплоскостности (полоса становится плоской).

Выводы.

1. На основе проведенных лабораторных экспериментальных исследований при прокатке свинцовых полос, моделирующих горячую прокатку, показано, что дробление деформаций по ширине, повышает устойчивость проката к потере плоской формы. Показаны оптимальные ширина локальных участков и необходимая неравномерность деформации между ними по ширине проката.

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

3. Рассмотренную в работе схему напряженно-деформированного состояния можно реализовать, например, при горячей прокатке с помощью валков с профилировкой в виде кольцевых проточек.

Литература:

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

2. Железнов, Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос / Ю.Д. Железнов. - Москва: Металлургия, 1971. – 200 с.

3. Rebecca Nakhoul, Pierre Montmitonnet, Nicolas Legrand. Manifested flatness defect prediction in cold rolling of thin strips. International Journal of Material Forming, Springer Verlag, 2015, 8 (2), P. 283-292.

4. Rebecca Nakhoul, Pierre Montmitonnet, Sami Abdelkhalek. Flatness Defects in Thin Strip Cold Rolling and the Friction Impact on it. Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 40, 2012, 11 p.

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

6. 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.

7. 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.

8. Гордиенко, В.М. Повышение устойчивости тонких полос к потере плоской формы / В.М. Гордиенко, С.В. Закарлюка // II Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых». – Донецк: ДонНТУ, 2025. – С. 81-84.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НАТЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ДЛЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НЕПЛОСКОСТНОСТИ

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

Волнистость и коробоватость полос являются одними из видов дефектов плоскостности тонколистовой прокатки. Производство полосового проката практически на всех участках передела происходит с приложением сил натяжения. При упругом растяжении неплоских полос в процессе обработки изменяется их напряженно-деформированное состояние. Неравномерно распределяются напряжения натяжения по ширине проката, достигая максимума в центре для волнистых и на кромках для коробоватых полос.

При растяжении полос с несимметричной неплоскостностью напряжения натяжения распределяются неравномерно между кромками. Возникающие при этом максимальные напряжения могут вызвать обрыв и поперечное смещение полосы, а также ухудшить ее плоскостность. Максимальные напряжения натяжения зависят не только от величины и вида дефекта, но и от закона распределения напряжений по ширине полосы. В процессе растяжения неплоской полосы снизить уровень максимальных напряжений возможно путем уменьшения уровня силы натяжения, однако такой вариант, как правило, ограничен технологией производства.

Снизить максимальные растягивавшие напряжения в полосе с несимметричной неплоскостностью возможно путем перераспределения натяжения между кромками полосы. Для осуществления этого в работах [1, 2] предлагается разворачивать натяжные ролики и прикладывать силу натяжения к полосе под углом в горизонтальной плоскости. Сущность способа иллюстрирует рисунок 1. Разворот, например, S-образных натяжных роликов под углом φ в горизонтальной плоскости приводит к снижению напряжений натяжения по кромке с большим напряжением натяжения и увеличению по кромке с меньшим уровнем. В итоге снижаются максимальные напряжения натяжения по ширине полосы.

Целью настоящей работы является получение зависимостей для расчета необходимого угла приложения силы натяжения для снижения максимальных напряжений при упругом растяжении полос с несимметричной неплоскостностью для синусоидального закона.

Рассмотрим напряженное состояние при упругом растяжении полос с приложением сил натяжения под углом в горизонтальной плоскости. На рисунке 2 показаны эпюры распределения напряжений натяжения по кромкам полосы с несимметричной волнистостью и коробоватостью для синусоидального закона.

Рассмотрим расчет необходимого угла для выравнивания напряжений натяжения по кромкам полосы.

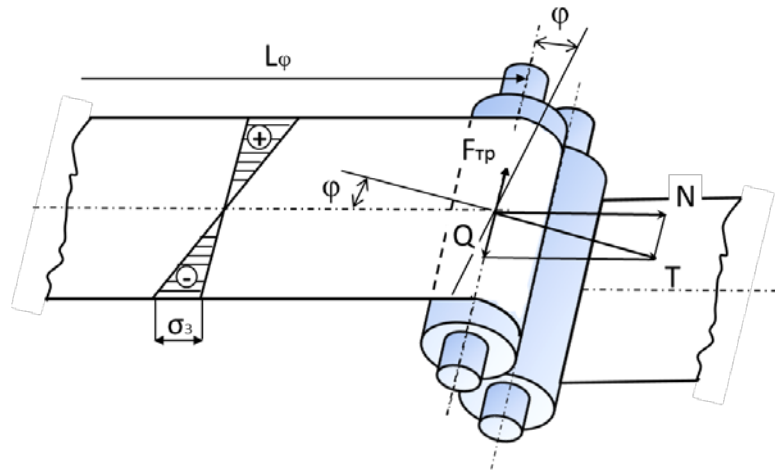


Рисунок 1 – Схема приложения силы натяжения к полосе под углом φ в горизонтальной плоскости

Разворот натяжных роликов (рисунок 1) вызывает упругое растяжение одной кромки и сжатие другой на величину ΔL , тогда угол разворота (угол приложения силы натяжения) определится из выражения

$$\varphi = \arctg \frac{2\Delta L}{B}, \quad (1)$$

Величина ΔL при упругом растяжении полосы от разворота роликов равна

$$\Delta L = \Delta \varepsilon_{\text{упр}} L_{\varphi}, \quad (2)$$

где L_{φ} – длина участка полосы, на котором приложено натяжение;

B – ширина полосы;

$\Delta \varepsilon_{\text{упр}}$ – относительная упругая деформация полосы от разворота роликов, равная

$$\Delta \varepsilon_{\text{упр}} = \sigma_3 / E, \quad (3)$$

где σ_3 – напряжение натяжения, возникающее по кромкам полосы от приложения силы натяжения под углом;

E – модуль упругости полосы.

Тогда вместо (1) с учетом (2) и (3) получим

$$\varphi = \arctg \frac{2\sigma_3 L_{\varphi}}{BE}, \quad (4)$$

Из рисунка 2 с использованием принципа суперпозиции вычислим величину σ_3 , необходимую для выравнивания напряжений натяжения по кромкам полосы:

$$\sigma_3 = (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2) / 2 \quad (5)$$

где $(\Delta \sigma_1)$, $(\Delta \sigma_2)$ – неравномерность напряжений натяжения между левой, правой кромками соответственно и серединой полосы при натяжении, когда напряжения при растяжении распределяются по всей ширине.

Для несимметричной волнистости из [3, 4]:

$$\Delta \sigma_1 = a_b E \left(\frac{A_{01} \pi}{2\lambda_{01}} \right)^2, \quad (6)$$

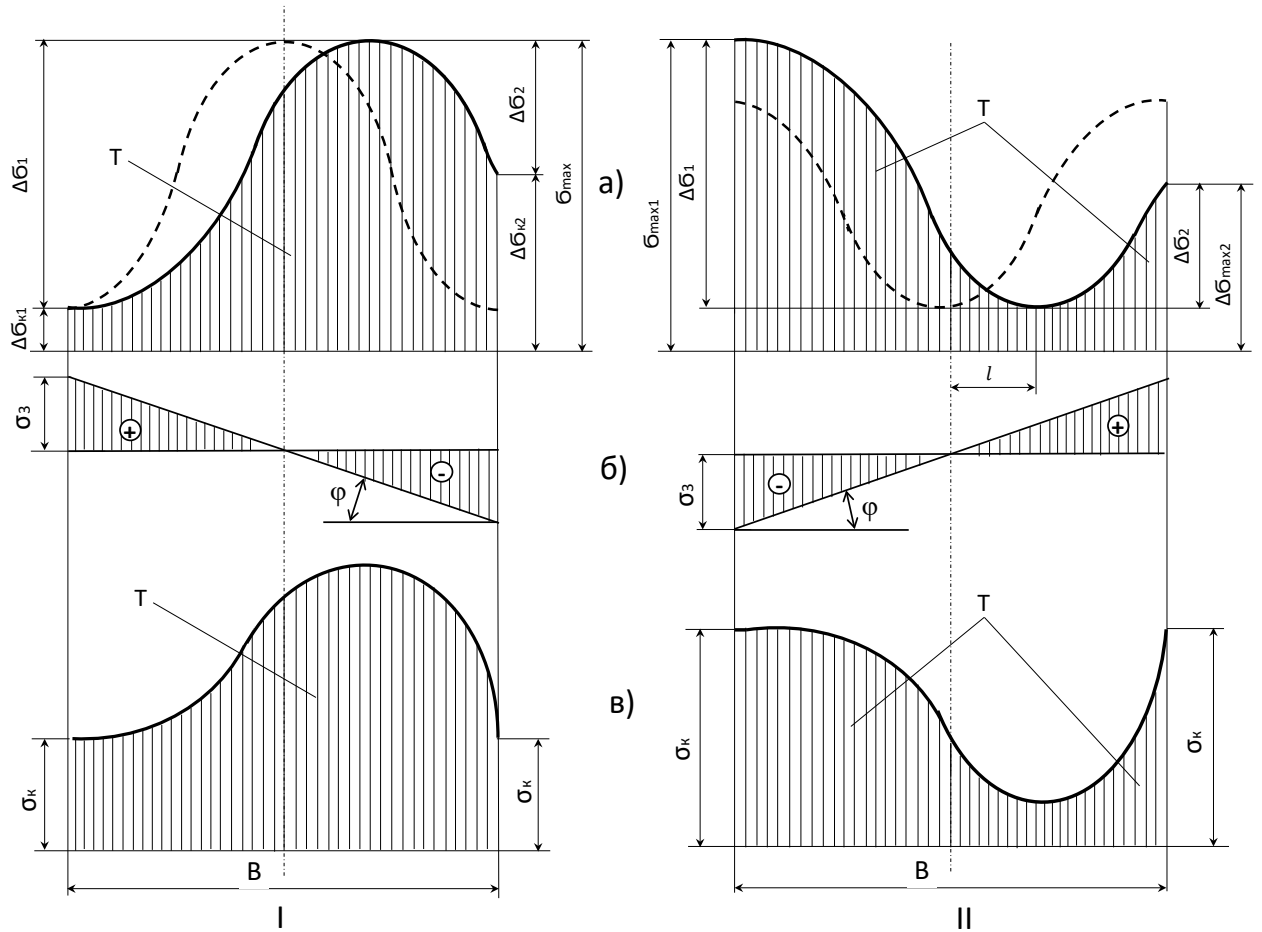


Рисунок 2 – Эпюры распределения напряжений натяжения по ширине несимметричных волнистых - I и коробоватых - II полос при упругом растяжении:

а - от приложения силы натяжения по оси полосы; б - от разворота натяжных роликов на угол φ в горизонтальной плоскости; в - суммарная эпюра от приложения силы натяжения под углом φ в горизонтальной плоскости

$$\Delta\sigma_2 = a_B E \left(\frac{A_{02}\pi}{2\lambda_{02}} \right)^2, \quad (7)$$

где A_{01}, λ_{01} и A_{02}, λ_{02} – амплитуда, период волнистости по левой и правой кромкам полосы соответственно;

a_B – коэффициент, учитывающий материальную связь участков по ширине полосы ($a_B \approx 1$).

Для несимметричной коробоватости из [3, 4]:

$$\Delta\sigma_1 = a_B E \left(\frac{A'_0\pi}{2\lambda'_0} \right)^2, \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\Delta\sigma_1}{2} \left(\cos \frac{2\pi B}{B+2l} + 1 \right), \quad (9)$$

где A'_0, λ'_0 – амплитуда и период коробоватости соответственно;

l – величина смещения несимметричной коробоватости относительно оси полосы.

Окончательно, подставив (5) в (4), с учетом (6), (7), (8), (9), получим необходимую величину угла приложения силы натяжения φ для выравнивания напряжений по ширине полосы с несимметричной волнистостью и коробоватостью:

– для волнистости

$$\varphi = \arctg \left[\frac{\pi^2 L \varphi}{4 \lambda_0^2 B} (A_{01}^2 - A_{02}^2) \right], \quad (10)$$

– для коробоватости

$$\varphi = \arctg \left\{ \frac{L \varphi}{B} \left[\left(\frac{A'_0 \pi}{2 \lambda'_0} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{1}{2} \left(\cos \frac{2 \pi B}{B + 2l} + 1 \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

Рассчитанный по формулам (10), (11) угол φ для обеспечения устойчивого положения полосы по оси обработки не должен превышать, как следует из анализа рисунка 1, арктангенса коэффициента трения на контакте полоса-натяжной ролик. Например, при коэффициенте трения между стальными поверхностями роликов и полосы, равным 0,3, угол поворота натяжных роликов φ не должен превышать 18° .

Как видно из рисунка 2, в напряжения натяжения по кромкам σ_k выравниваются и становятся меньше максимальных напряжений $\sigma_{\max}$, чем это было до разворота роликов на угол φ . Это позволит снизить уровень максимальных напряжений, а, следовательно, понизить вероятность обрывности полос, особенно это относится к коробоватым полосам, где максимальные напряжения натяжения сосредоточены по кромкам.

Кроме того, так как существующие устройства в ПДС не позволяют устранять поперечное смещение полосы, ухудшающее, плоскостность полос, зависимости (11), (12) можно использовать для центрирования проката по оси обработки.

Это позволит не только стабилизировать технологию правки-дрессировки, но и плоскостность оцинкованных полос.

На рисунке 3 для примера показана зависимость угла поворота роликов φ (угла приложения силы натяжения) необходимого для выравнивания напряжений натяжения по кромкам стальной холоднокатаной полосы от несимметричности волнистости и коробоватости ($\lambda_0 = 1000$ мм, $B = 1000$ мм) при обработке в протяжной печи отжига в агрегате непрерывного горячего цинкования (АНГЦ) ($L\varphi = 167000$ мм).

Выводы

1. Получены зависимости для расчета угла приложения силы натяжения от параметров несимметричной волнистости и коробоватости при упругом растяжении полос для синусоидального закона распределения напряжений по ширине.

2. Использование этих зависимостей позволит более равномерно перераспределить напряжения натяжения по кромкам полос, снизить максимальные напряжения натяжения, что снизит вероятность обрывности полос, стабилизирует технологию и улучшит плоскостность проката при обработке в непрерывных агрегатах.

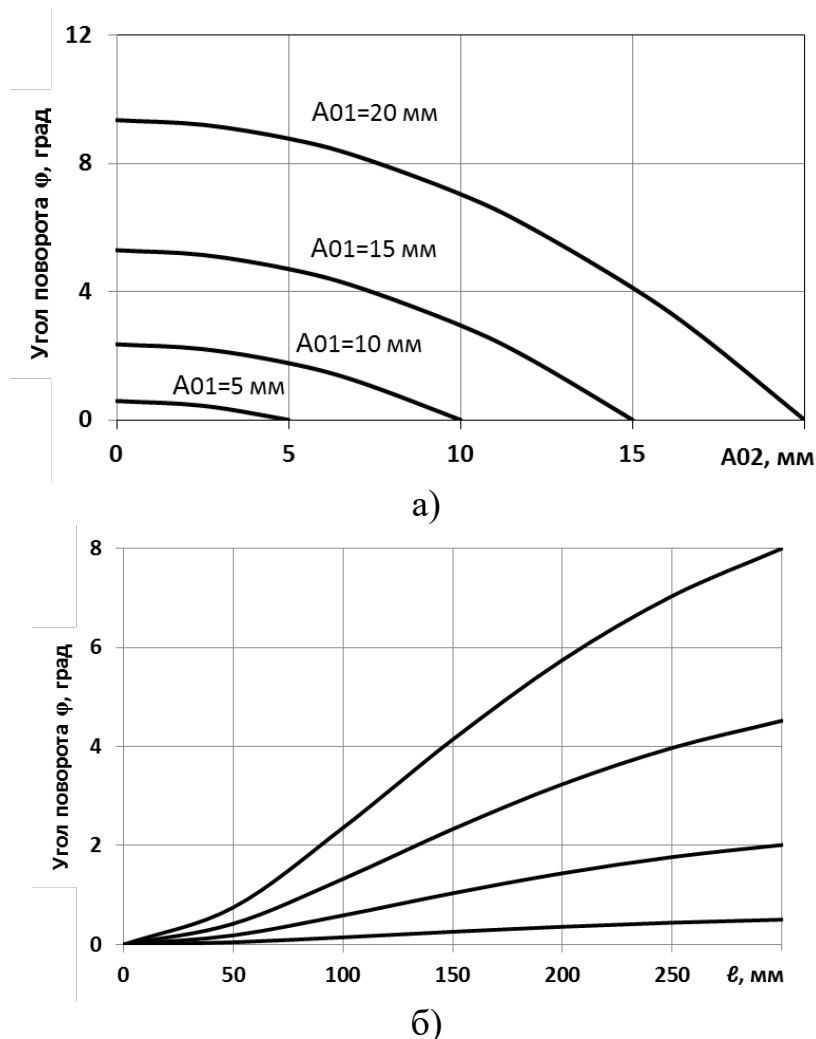


Рисунок 3 - Зависимость угла поворота натяжных роликов от несимметричности неплоскостности полос в печи отжига АНГЦ:
а - для волнистости; б - для коробоватости

Литература:

1. А.с. СССР, 1131571, МКИ В21В 1/22. Способ дрессировки полос, А.М. Онищенко, В.М. Богатырев, Е.В. Байков и др.; заявители Донецкий политехнический институт.- №3475286; заявл. 26.07.82; опубл. 29.10.83, Бюл. № 39.
2. А.с. СССР, 1255227, МКИ В21В 39/08. Устройство для натяжения полосы (его варианты), В.М. Клименко, А.М. Онищенко, В.М. Богатырев и др.; заявители Донецкий политехнический институт.- №3808164; заявл. 31.10.84; опубл. 07.09.86, Бюл. № 33.
3. Упругое растяжение неплоских полос при синусоидальном законе распределения напряжений / Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, В.Е. Гончаров и др.// Физика и техника высоких давлений. – 2020, том 30, № 2, С.88-97.
4. Закарлюка, С.В. Сравнительный анализ влияния различных законов распределения напряжений натяжения по ширине неплоской полосы и несимметричности дефекта на параметры неплоскостности / С.В. Закарлюка // Физика и техника высоких давлений. – 2024. -том 34, № 2. – С. 79-89.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЛИБРОВКИ ПРЕДЧИСТОВОГО ОВАЛЬНОГО КАЛИБРА ДЛЯ ПРОКАТКИ КРУГЛОГО ПРОФИЛЯ ДИАМЕТРОМ 50 ММ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ 390

Кукушкина Ю.Ю., Яковченко А.В.
Донецкий национальный технический университет

Повышение качества круглых профилей на основе системы калибров овал-круг является актуальной задачей. Ее решение рассмотрено в работах [1, 2 и др.]. Известно, что рациональная калибровка валков обеспечивает плавный и надежный захват металла валками, устойчивое положение раската в круглом калибре, а также высокую точность требуемых размеров круглого профиля. При разработке конструкции предчистового овального калибра следует анализировать закономерности течения металла в круглом калибре. Необходимо учитывать, что разновременность захвата овального раската повышает вероятность образования трещин на поверхности круглых профилей. Особенно актуальны решения, которые улучшают устойчивость полосы в момент захвата.

Применяемые на практике технологические решения не обеспечивают при захвате, а также в процессе прокатки круглых профилей в чистовом калибре одновременный по периметру или боковым участкам калибра контакт с поверхностью овального раската.

Вместе с тем даже небольшие отклонения оси овального раската от оси калибра могут привести к потере его устойчивости и образования по этой причине поверхностных дефектов.

На практике широко применяются вводные линейки, которые удерживают раскат в круглом калибре и предупреждают его сваливание. Однако обеспечивая таким образом устойчивость раската за счет плотной установки линеек относительно профиля можно получить на его поверхности «заусенцы».

Поставлена задача уменьшить вероятность образования поверхностных дефектов при прокатке круглых профилей диаметром 50 мм (по ГОСТ 2590-2006) на непрерывном стане 390 за счет повышения устойчивости овального раската в круглом чистовом калибре. Ее решение достигается за счет получения в момент захвата одновременного контакта металла с калибром по боковым участкам овального раската. При этом необходимо нормировать обжатие металла на указанных участках, которое должно быть переменным по ширине профиля. Также обжатие должно обеспечивать заданный коэффициент вытяжки в круглом чистовом калибре. Например, в окне программы, показанном на рисунке 1, коэффициент вытяжки задан равным $k=1,19$.

Решение поставленной задачи может дать способ [3], который направлен на обеспечение самоцентрировки предчистового овального раската в чистовом круглом калибре. Требуемые расчеты для прокатки круглого профиля диаметром 50 мм выполнены в окне специализированной компьютерной программы, показанном на рисунке 1.

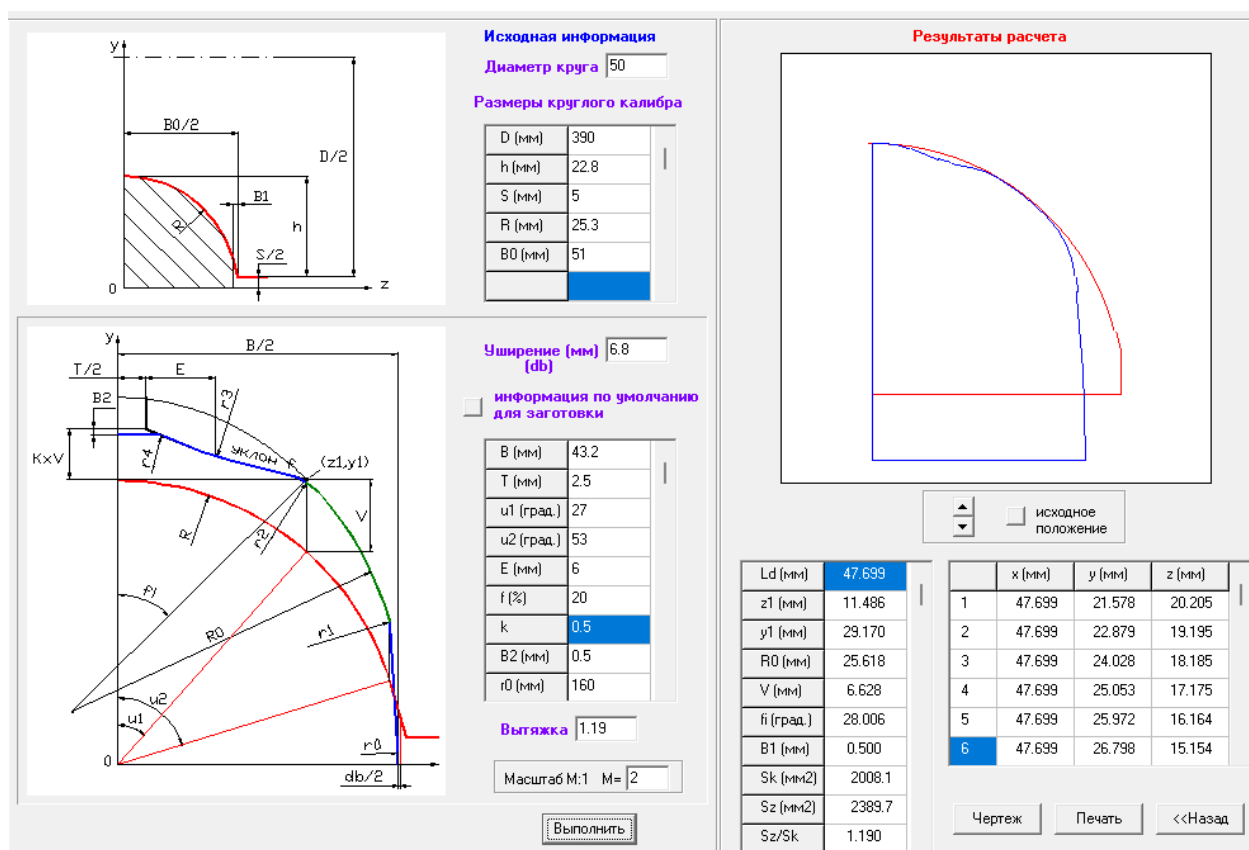


Рисунок 1 – Расчёт размеров предчистового овального калибра
(в окошке результатов расчета показан первый момент контакта спроектированного контура овального раската с круглым калибром)

При потере устойчивости овального раската и, соответственно, его наклоне относительно вертикальной оси боковые участки раската, расположенные по диагонали, контактируют с круглым калибром. Возникающие при этом силы, направленные к вертикальной оси калибра, удерживают его от сваливания.

В овальном калибре боковые участки получены ограниченными центральными углами $u_1 = 27^\circ$ и $u_2 = 53^\circ$ (рисунки 1, 2). Указанные боковые участки предчистового овала выполнены радиусами $R_0 = 25,6$ мм, которые обеспечивает одновременный захват металла в круглом калибре. Соответственно, при прокатке по боковым участкам овального раската длина очага деформации равна const ($L_d = 47,7$ мм) (рисунок 1).

Применение способа [3] снижает вероятность «сваливания» овального раската, а также вероятность образования поверхностных дефектов при прокатке круглых профилей диаметром 50 мм путем обеспечения в момент захвата одновременного по ширине боковых участков овального раската контакта металла с круглым калибром.

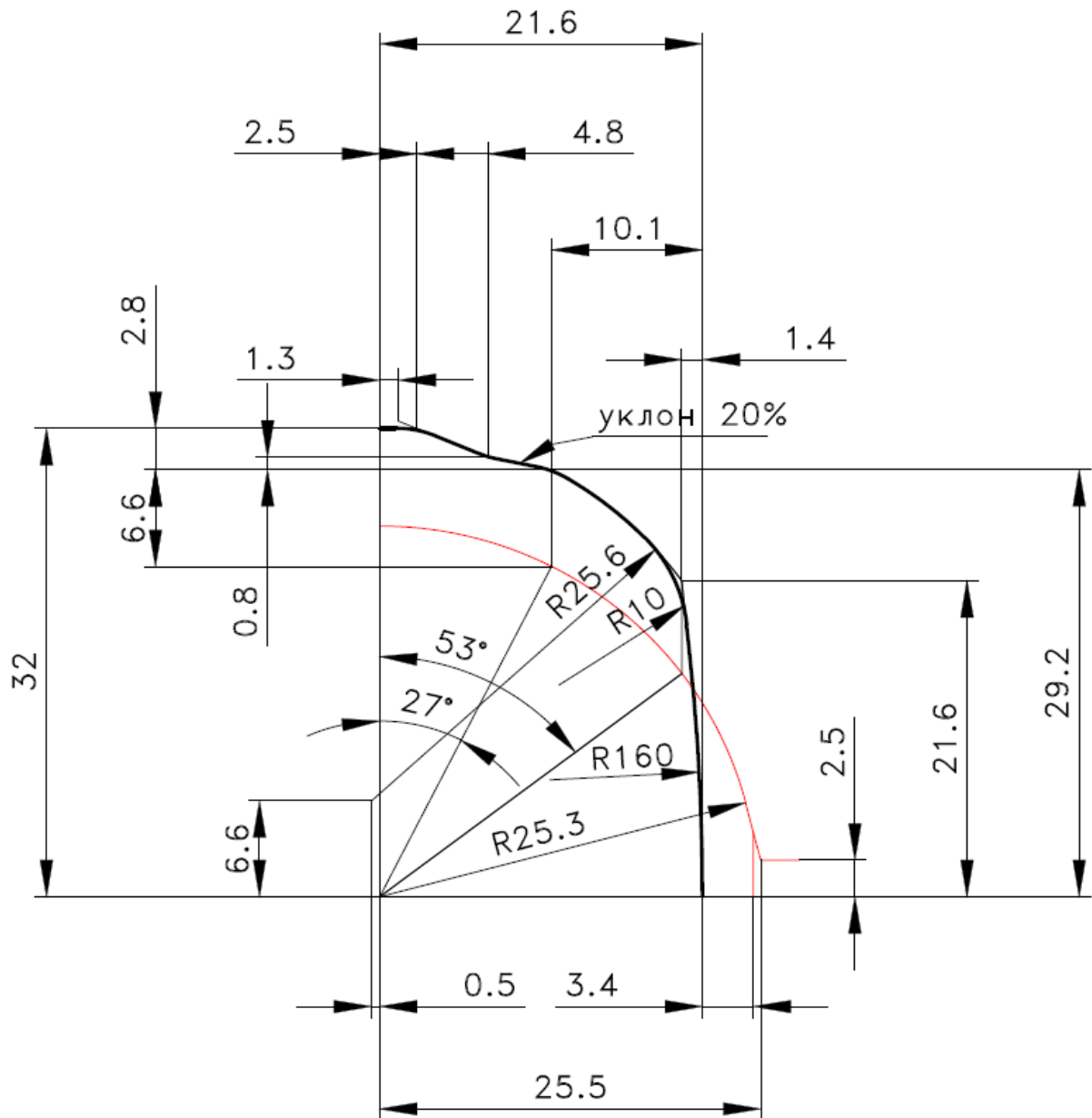


Рисунок 2 - Чертежи круглого и предчистового овального калибров для прокатки круглого профиля диаметром 50 мм

Литература:

- 1 Прокатка и калибровка. Том I (Справочник). Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев / Под ред. Б.М. Илюковича. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 506с.
2. Чекмарев, А.П. Калибровка прокатных валков / А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машковцев -М.: Металлургия, 1971. - 512с.
3. Шум В.Б., Яковченко А.В., Никишин В.М., Курилов А.В., Гайдук Р.Е., Борискин В.В. Способ прокатки круглых профилей. Пат. 102915 Украина, МПК (2012) B21B 1/02. - № а201200925; Заявл. 30.01.2012; Оpubл. 27.08.2013; Бюл. №16.

РАЗРАБОТКА ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРХНЕМ РОЛИКЕ ТРЕХВАЛКОВОЙ ЛИСТОГИБОЧНОЙ МАШИНЫ НА БАЗЕ МЕТОДА ПЛАНИРУЕМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Тимоха А.С., Яковченко А.В.

Донецкий национальный технический университет

В условиях Харцызского трубного завода трубные заготовки для одношовных сварных труб большого диаметра получают на трехвалковой листогибочной машине «Haeusler». Они формуются из листа верхним нажимным и двумя нижними опорными роликами.

Рациональные режимы формовки обеспечивают высокое качество сварных труб [1]. Указанные режимы должны учитывать марку стали, толщину стенки для рассматриваемого в работе диаметра труб, равного 1420 мм, а также зависят, от расстояния между нижними роликами. Актуально проверить не будет ли при назначенных режимах формовки превышение допустимого значения напряжения изгиба в верхнем ролике, которое равно $[P] = 450 \text{ Н/мм}^2$.

Разработку формулы для расчета напряжений изгиба P в верхнем ролике трехвалковой листогибочной машины выполним на базе метода планируемого эксперимента и специализированной компьютерной программы «Bending Set v7 Haeusler AG».

Расчетный эксперимент спланируем по плану второго порядка [2], при этом применим центральное композиционное ортогональное планирование для факторов, которые изменяются в следующих диапазонах:

$$400 \leq x_1 \leq 620 \text{ Н/мм}^2; 15 \text{ мм} \leq x_2 \leq 40 \text{ мм}; 750 \text{ мм} \leq x_3 \leq 900 \text{ мм}, \quad (1)$$

где x_1 (σ) – предел текучести стали, x_2 (S) – толщина стенки трубы, x_3 (L) – расстояние между нижними роликами листогибочной машины.

На первом этапе выполним кодирование факторов, а затем - расчет соответствующих значений факторов в натуральных переменных.

Определим связь между натуральными и кодовыми переменными по формуле [2]:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\delta}, \quad (2)$$

где x_i - кодовое значение фактора;
 X_i - натуральное значение фактора;
 x_0 - значение фактора на нулевом уровне;
 δ - интервал варьирования фактора.

Результаты кодирования факторов представлены в табл. 1. На их основе разработана план матрица проведения расчетного эксперимента (табл. 2).

Таблица 1 – Кодирование факторов и уровни их варьирования

Интервал варьирования и уровни факторов	σ , Н/мм ²	S, мм	L, мм
Нулевой уровень, x_0	510	27,5	825
Интервал варьирования, δ	91	10	62
Нижний уровень, $x_i = -1$	419	17,5	763
Верхний уровень, $x_i = +1$	601	37,5	887
Нижний уровень в звездной точке, $x_i = -1,2154$	400	15	750
Верхний уровень в звездной точке, $x_i = +1,2154$	620	40	900

Таблица 2 – План-матрица эксперимента

Номер опыта	Факторы, их кодовые и натуральные значения						Параметр Р, Н/мм ²
	x_1	x_2	x_3	σ , Н/мм ²	S, мм	L, мм	
1	-1	-1	-1	419	17,5	763	73
2	+1	-1	-1	601	17,5	763	124
3	-1	+1	-1	419	37,5	763	462
4	+1	+1	-1	601	37,5	763	677
5	-1	-1	+1	419	17,5	887	58
6	+1	-1	+1	601	17,5	887	101
7	-1	+1	+1	419	37,5	887	392
8	+1	+1	+1	601	37,5	887	577
9	-1,2154	0	0	400	27,5	825	200
10	+1,2154	0	0	620	27,5	825	333
11	0	-1,2154	0	510	15	825	56
12	0	+1,2154	0	510	40	825	601
13	0	0	-1,2154	510	27,5	750	296
14	0	0	+1,2154	510	27,5	900	240
15	0	0	0	510	27,5	825	266

Формулу для параметра Р найдем в виде полинома второй степени

$$P = a_0 + a_1\sigma^2 + a_2S^2 + a_3L^2 + a_4\sigma + a_5S + a_6L + a_7\sigma S + a_8SL + a_9\sigma L + a_{10}\sigma SL. \quad (3)$$

Используя компьютерную программу, окно которой показано на рис. 1, были выполнены 15 опытов (см. табл. 2). При этом определили напряжение изгиба в верхнем ролике трехвалковой листогибочной машины Р при заданных

значения факторов σ , S , L . В табл. 2 в столбце «Параметр» указаны результаты расчета напряжения изгиба P в запланированных опытах.

Расчет установок для гибки

Характеристики трубы

- 01 Наружный диаметр
- 02 Длина листа
- 03 Толщина листа
- 04 Предел текучести
- 05 Модуль Юнга (E)
- 06 Модуль Н
- 07 Развертка листа

Da	56,00	дюймов
B	12000,00	мм
s	25,00	мм
Re	565,00	N/mm ²
E	210000	N/mm ²
H	1000	N/mm ²
$L_{\text{листа}}$	4390	мм

Характеристики нижнего ролика

- 08 Расстояние между нижними роликами
- 09 Диаметр нижнего ролика

X_{uw}	900	мм
D_{uw}	500	мм

Характеристики верхнего ролика

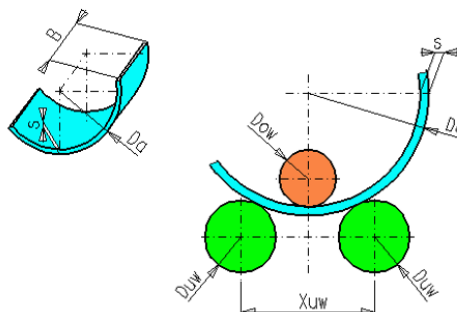
- 10 Диаметр верхнего ролика

D_{ow}	780	мм
----------	-----	----

Варианты гибки

- 11 Количество проходов для гибки
- 12 Проходы ролика
- 13 Поправочный коэффициент для величины натяжения

i	3				
n_i	60,0	30,0	10,0		%
k_v	1,0	1,0	1,0	1,0	[1]



Параметры

		1-й проход	2-й проход	3-й проход	4-й проход	
14a Глубина погружения без полного упругого восстановления	$Z_{i \text{ abs}}$	67,1	100,7	111,8	111,8	мм
14 Глубина погружения с полным упругим восстановлением	$Z_{i^* \text{ abs}}$	90,4	121,8	132,5		мм
15 Наружный диаметр без давления на верхний валок	$Da(i)$	2585	1612	1422		мм
16 Давление в цилиндре натяжения	$P_{3,4}$	90	101	104		бар
17 Давление в опорном цилиндре	$P_{1,2}$	96	106	110		бар
18 Напряжение изгиба на верхнем ролике	$\sigma_b(ow)$	188	211	218		N/mm ²

Рисунок 1 - Расчет режима формовки трубной заготовки для сварных труб диаметром 1420 мм

Используя натуральные значения факторов и соответствующие значения параметра P на базе метода наименьших квадратов были определены константы формулы (3):

$$a_0 = 446,810; a_1 = 0,0000592; a_2 = 0,401; a_3 = 0,000294; a_4 = -0,969; a_5 = -20,192; a_6 = -0,580; a_7 = 0,0822; a_8 = -0,00175; a_9 = 0,000499; a_{10} = -0,0000487.$$

Относительные отклонения расчетной информации, полученной по формуле (3), по отношению к значениям P в табл. 2 не превышают 6 %.

Литература:

1. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Теория и технология трубного производства Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2001. — 544 с
2. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях: учеб. пособие / М. С. Винарский, М. В. Лурье. — Киев: Техника, 1975. — 168 с.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ФОРМОВКИ ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК СВАРНЫХ ТРУБ ДИАМЕТРОМ 1220 ММ НА СЕМИКЛЕТЬЕВОМ СТАНЕ

Чернышёва О.В., Яковченко А.В.

Донецкий национальный технический университет

На семиклетьевом стане Харцызского трубного завода формуют полуцилиндрические заготовки для сварных двухшовных труб диаметром 1220 – 1420 мм. При этом используемая технология позволяет применять листы меньшей ширины по сравнению с производством одношовных труб. Известно, что показатели качества сварных двухшовных труб не уступают одношовным.

Технологическая схема формовки полуцилиндрических заготовок показана на рис. 1 [1, 2]. После первого пропуска, выполняемого на гладкой бочке, во второй клетке осуществляется подгиб периферийных участков листа по радиусу готовой трубы. В следующих четырех клетях предусмотрен изгиб одного знака центральной части листа. В последней седьмой клетке выполняется разгиб заготовки до получения радиуса большего, чем радиус готовой полуцилиндрической заготовки на величину пружинения [1, 2].



Рисунок 1 – Схема формовки полуцилиндрической заготовки

Поставлена задача разработать усовершенствованную калибровку с учетом равномерного упрочнения металла формуемой полуцилиндрической заготовки для труб диаметром 1220 мм с толщиной стенки 27 мм из стали 10Г2ФБ.

Запишем условие равномерного упрочнения металла наружной поверхности формуемой полуцилиндрической заготовки в каждом из четырех пропусков после второго

$$\Delta\sigma_i = const, \tag{1}$$

где $\Delta\sigma_i$ – упрочнение металла в i -тых пропусках, H/mm^2 ;
 i - номер пропуска, $i=3, 4, 5, 6$.

В связи с тем, что периферийные участки полуцилиндрической заготовки в

первом пропуске формуются по радиусу готовой трубы и в следующих пропусках не изменяются, условие (1) выполним для ее центральной части.

Определим напряжения с учетом упрочнения по следующей известной зависимости

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^m, \quad (2)$$

где σ - нормальное напряжение, $H/мм^2$;

ε - относительная деформация;

A, m – параметры кривой упрочнения ($A=682 H/мм^2, m=0,064$).

Суммарная относительная деформация по наружной поверхности центральной части заготовки за четыре изгибающих пропуска (с третьего по шестой) может быть определена следующим образом

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{l_{\text{ц}6} - l_{\text{ц}0}}{l_{\text{ц}0}}, \quad l_{\text{ц}6} = \left(R_{\text{ц}6} + \frac{S}{2} \right) \cdot \varphi_{\text{ц}6}, \quad (3)$$

где $l_{\text{ц}0}$ – исходная длина центральной части заготовки до ее изгиба в третьем пропуске, мм.

$l_{\text{ц}6}$ – длина центральной части заготовки по ее наружной поверхности после шестого пропуска, мм

где $R_{\text{ц}6}$ – радиус центральной части заготовки в 6-ом пропуске, мм;

$\varphi_{\text{ц}6}$ – угол центральной части заготовки в 6-ом пропуске, рад;

S - толщина листа, мм.

Упрочнение в каждом из четырех изгибающих пропусков равно:

$$\Delta\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\Sigma} - \sigma_m, \quad \sigma_{\Sigma} = A \cdot \varepsilon_{\Sigma}^m; \quad \Delta\sigma_i = \frac{\Delta\sigma_{\Sigma}}{4}; \quad (4)$$

где σ_m - предел текучести металла, $H/мм^2$ ($\sigma_m = 470 H/мм^2$)

Относительная деформация в каждом пропуске ε_i равна:

$$\sigma_m + i \cdot \Delta\sigma_i = A \cdot \varepsilon_i^m, \quad \varepsilon_i = \sqrt[m]{\frac{\sigma_m + i \cdot \Delta\sigma_i}{A}}. \quad (5)$$

Запишем формулы для расчета длины центральной части полуцилиндрической заготовки l_i , а также радиусов R_i и углов формовки $\varphi_{\text{ц}i}$ с учетом равномерного упрочнения металла

$$l_{\text{ц}i} = l_{\text{ц}2} \cdot \varepsilon + l_{\text{ц}2}, \quad \varphi_{\text{ц}i} = \frac{l_{\text{ц}i}}{R_i - \frac{S}{2}} = \frac{l_i}{R_i}, \quad R_i = \frac{l_i \cdot S}{2(l_i - l_{\text{ц}i})}. \quad (6)$$

Полученные результаты расчета представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1 – Результаты расчета параметров калибровки для формовки полуцилиндрической заготовки с учетом равномерного упрочнения металла для сварных труб диаметром 1220 мм

№ клетки	ε_i	$l_i, \text{мм}$	$R_i, \text{мм}$	$\varphi_{\text{ци}}, \text{град}$	$\Delta\sigma_i, \text{Н/мм}^2$
3	0,008	1373	1723	46	15
4	0,013	1379	1093	73	15
5	0,020	1389	699	114	15
6	0,031	1404	454	177	15

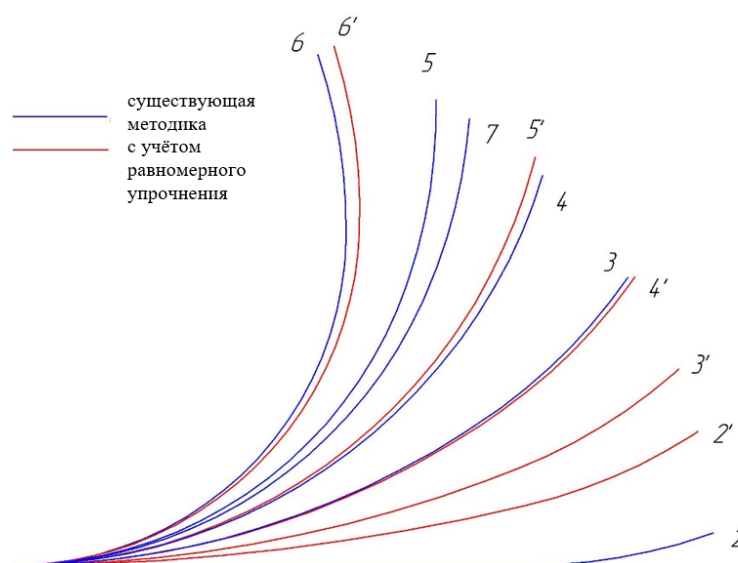


Рисунок 2- Сравнение профилировок, полученным по различным методикам

В заключение следует отметить, что усовершенствованная калибровка обеспечивает равномерное упрочнение металла в процессе формовки полуцилиндрических заготовок, что направлено на стабилизацию их размеров и исключение образования трещин.

Литература:

1. Рымов, В.А. Совершенствование производства сварных труб / В.А. Рымов, П.И. Полухин, И.Н. Потапов. – М. «Металлургия», 1983. – 312 с.
2. Семенченко, А.Р. Усовершенствованная технологическая схема формовки полуцилиндрических заготовок для сварных двухшовных труб большого диаметра / А.Р. Семенченко, А. В. Яковченко // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» (28–29 мая 2024 г.). — Донецк: ДОННТУ, 2024. — С. 125–127.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ СЖАТИИ

Чумак Н.Ю., Яковченко А.В.

Донбасский государственный технический университет

Горячекатаные профили для крепи горных выработок используются в арочной крепи капитальных и подготовительных выработок шахт. Поэтому они разрабатываются с учетом значительных нагрузок горного давления. Решение актуальной задачи повышения несущей способности профилей этого типа может быть получено на базе анализа напряженно-деформированного состояния, которое имеет место, прежде всего, при их изгибе и сжатии.

Настоящая работа посвящена исследованию механизма потери устойчивости при сжатии профилей для крепи горных выработок СВП 27 и СПА 27 (рис.1), которые по своим характеристикам превосходят, как известно, отечественные и зарубежные аналоги.

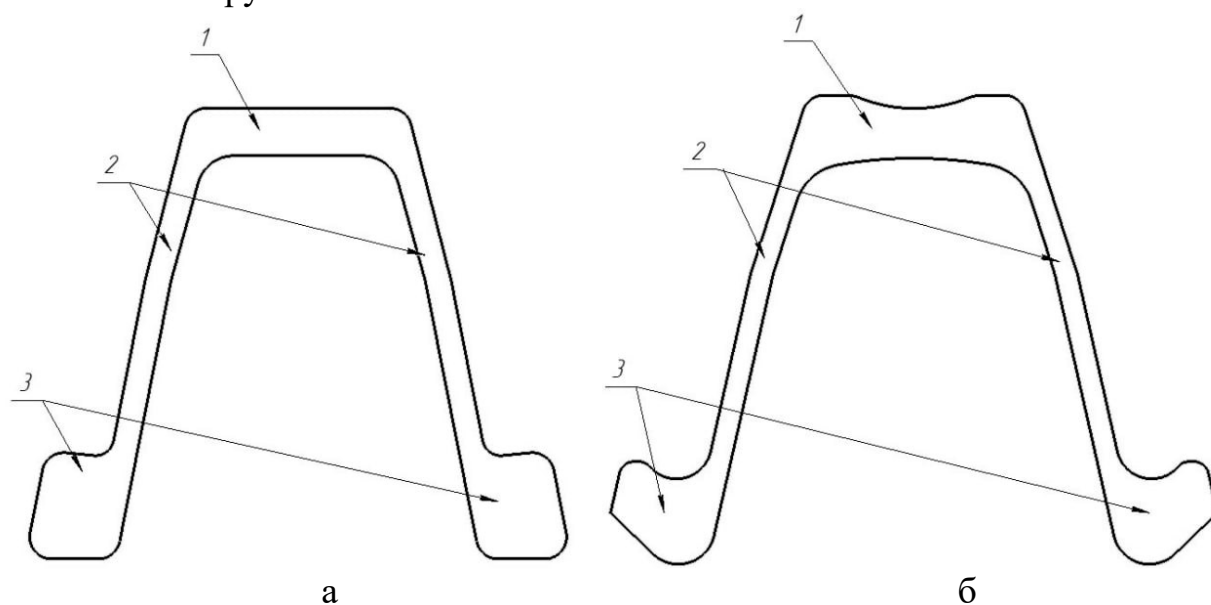


Рисунок 1 – Контуры сечений профилей для крепи горных выработок:

а - СВП [1]; б - СПА [2]

1 – полка; 2 – стойки; 3 – фланцы

Профили для крепи горных выработок СВП и СПА (рис.1) включают полку и симметрично сопряженные с ней наклонные боковые стойки с опорными фланцами на концах. У СВП полка имеет постоянную толщину, а верхние и нижние поверхности фланцев выполнены плоскими. У СПА полка имеет переменную толщину, а фланцы допускают возможность принудительного зацепления при сопряжении профилей. Профили для крепи горных выработок в основном прокатывают из конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5.

Моделирование напряженно-деформированного состояния образцов

профилей при их сжатии выполнено на базе метода конечных элементов в системе DEFORM 3D [3]. Генерация конечно-элементной сетки с четырехузловыми тетраэдрами, имеющими размеры 2 – 3 мм, выполнялась в автоматическом режиме. При моделировании процесса сжатия образцы длиной 1000 мм из стали марки стали AISI-1030, являющейся аналогом стали Ст5, при температуре 20°C были расположены между двумя плоскими плитами, при этом верхнюю плиту перемещали вниз со скоростью 1 мм/с. Для плит была выбрана модель недеформируемого материала. Трение на контакте плит и заготовок определяли по закону Зибеля (при коэффициенте трения, равном $\mu=0,12$). Решали упруго-пластическую задачу. Результаты даны на рис. 2 и 3.

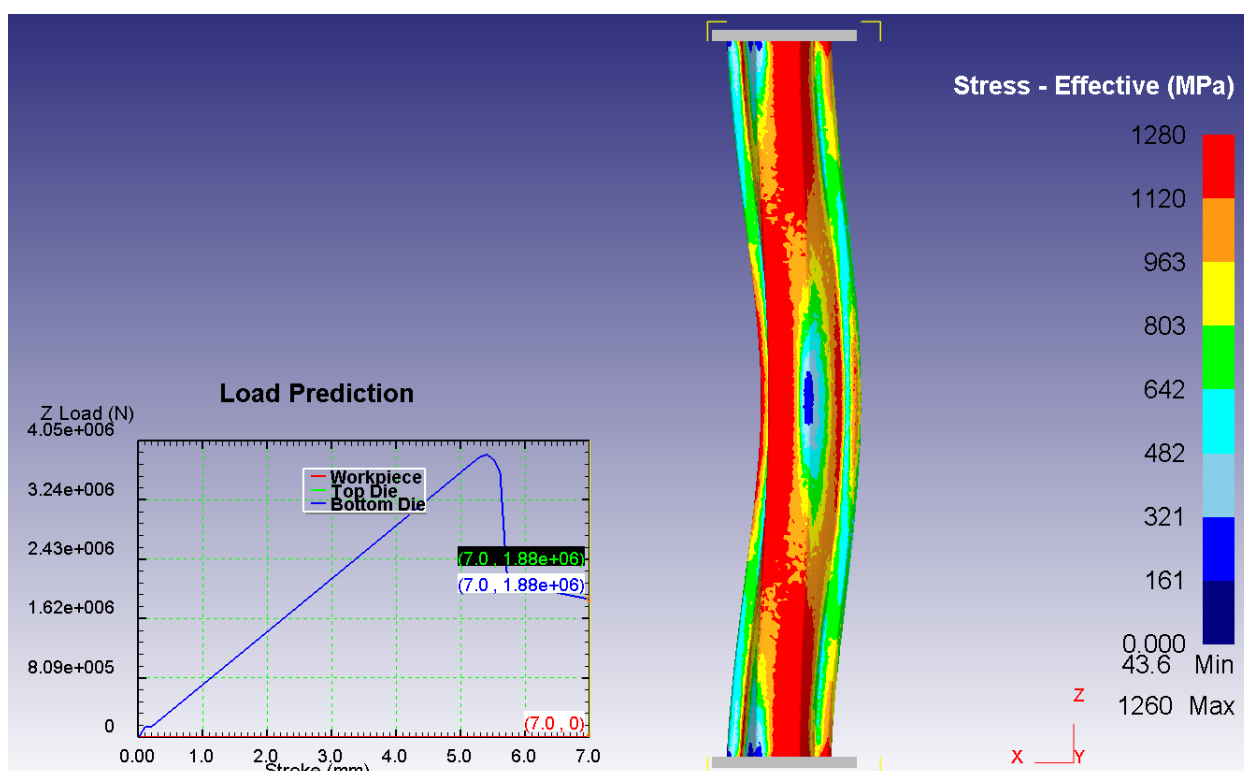


Рисунок 2 – Результаты моделирования образца СВП 27 на сжатие

Устойчивость СВП 27 (рис. 2) и СПА 27 (рис. 3) характеризуется приложенными силами, а также полученными значениями их сжатия и распределением по объему образцов интенсивности напряжений. В образце СВП 27 интенсивность напряжений находится в диапазоне 43,6 – 1260 МПа, в образце СПА 27 – в диапазоне 26,6 – 1260 МПа. Причем напряжения распределены крайне неравномерно. В средней части образцов, которая соответствует их максимальному прогибу, значения интенсивности напряжений у СВП 27 большие, чем у СПА 27.

Потеря устойчивости образца СВП 27 получена при его сжатии на 5,4 мм при силе 3,85 МН, у образца СПА 27 – при его сжатии на 5,5 мм при силе 3,95 МН. При этом лавинообразное падение силы у СВП 27 имело место до 2,1 МН, а у СПА до 2,5 МН. При сжатии образцов профилей на 7 мм у СВП 27

получена сила, равная 1,88 МН, а у СПА 27 – 2,31 МН (рис. 2, 3). Исходя из результатов можно сделать вывод, что устойчивость при сжатии у СВП 27 получена ниже, чем у СПА 27.

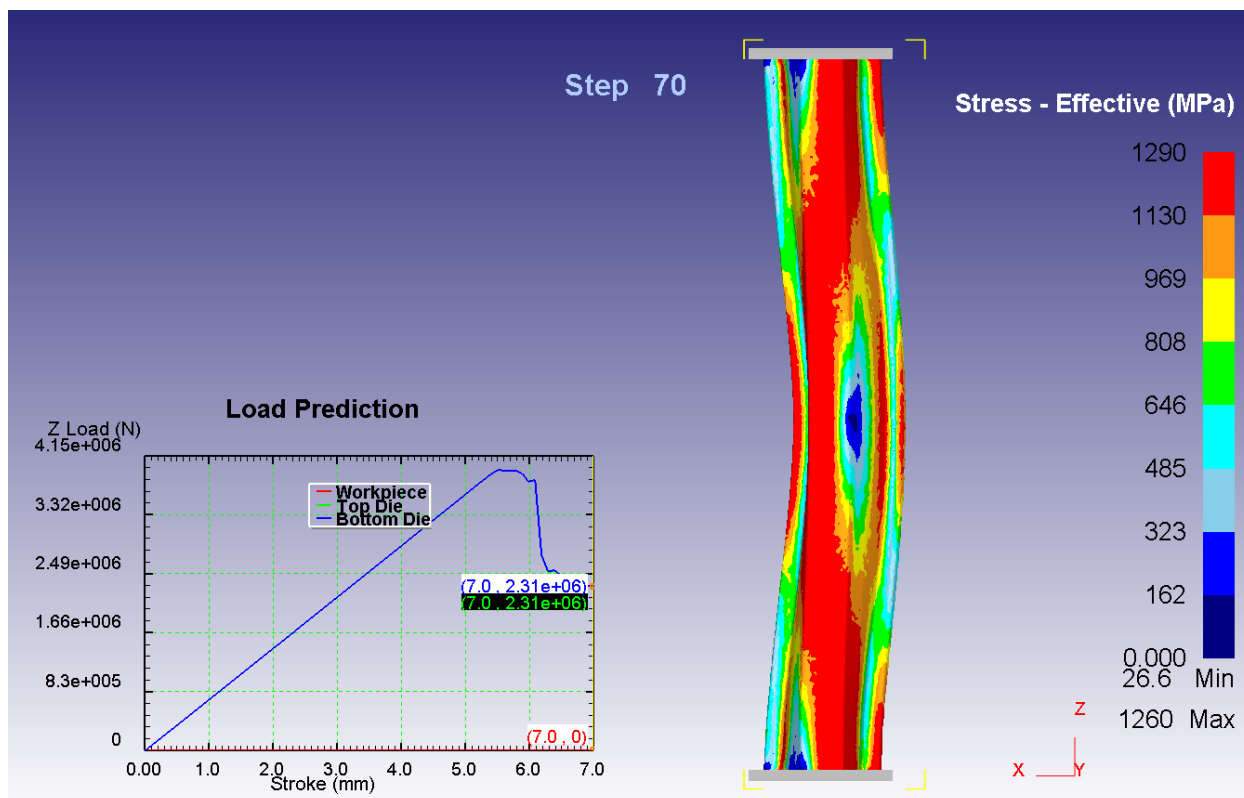


Рисунок 3 – Результаты моделирования образца СПА 27 на сжатие

В дальнейшем актуально выполнить исследования несущей способности СВП 27 и СПА 27 при их упругом и пластическом изгибе в зависимости от значений соответствующих прогибов и сделать вывод о целесообразности разработки нового профиля для крепи горных выработок, также имеющего массу погонного метра 27 кг, но с более высокими показателями.

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. Гречников, В.Ф. Моделирование объектов в металлургии и обработке металлов давлением / В.Ф. Гречников, И.П. Петров, А.Г. Шляпугин. — Самара; Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007 — 92 с.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЗОНЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ

Гангало А.Н.^{1,2}, Мирошниченко С.В.¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт имени А.А. Галкина»

²ФГБНУ Институт физики горных процессов

Равноканальное угловое прессование (РКУП) широко применяется для управления свойствами материалов за счёт формирования структур в широком диапазоне размерных уровней [1]. К такому эффекту приводит реализация схемы простого сдвига, осуществляемая за счет пересекающихся каналов, и имеющая возможность многократного повторения [2]. При этом степень эволюции структуры напрямую зависит от технологических параметров деформирования [3].

Анализ возможных эффектов при варьировании любого из параметров деформирования эффективно реализуется методом конечных элементов (МКЭ). Данный вычислительный подход послужил основой для изучения влияния различных технологических параметров на ключевые факторы, определяющие перестройку структуры и технологичность процесса при интенсивной пластической деформации [4-6].

Гидростатическое давление в зоне пластической деформации считают важнейшим фактором в реализации сдвиговых микроструктурных превращений [1,7]. Однако до сих пор нет работ, где этот фактор был бы проанализирован систематически. Существующая аналитическая модель [2] связывает гидростатическую составляющую с контактным трением и углом прессования, но лишь для частного случая простого сдвига по прямой линии. Однако эти параметры коренным образом влияют на режим течения металла. Повышение коэффициента трения инициирует формирование веерной зоны [3], а увеличение угла пересечения каналов способствует образованию зазора у внешнего угла рабочего канала [6].

Следовательно, для обеспечения корректности расчёта гидростатического давления необходимо учитывать оба этих влияния. В настоящей работе взаимосвязь коэффициента трения и угла рабочего канала с развитием гидростатического давления в очаге деформации при РКУП детально исследована с помощью МКЭ.

Вычислительные эксперименты выполняли в среде ПК «DEFORM-2D» в двумерной постановке, исходя из допущения о плоском деформированном состоянии. Использовали заготовку с соотношением линейных размеров 1:5 и идеальную жесткопластическую модель материала с напряжением течения $\sigma_s=100\text{МПа}$.

Варьируемыми параметрами выступали: угол сопряжения каналов Φ , значения которого задавали в пределах от 90 до 120° и шагом 5°, и условия контактного трения, описываемые законом Амонтона-Кулона, с изменением

коэффициента μ в диапазоне от 0,05 до 0,3 с шагом 0,05.

Расчет выполняли при скорости пуансона 1 мм/с и температуре 20°C.

Для объективного сравнения с аналитическим решением использовали геометрию полости без радиусов сопряжения каналов. Усредненное значение гидростатического давления при этом определяли вдоль линии пересечения каналов [8], полностью повторяя схему аналитической модели [2]. При этом гидростатическое давление (p) по обобщённой зависимости В.М. Сегала приведено к относительным единицам (p'):

$$p' = \frac{p}{\sigma_s} = \frac{\mu + \operatorname{ctg} \frac{\Phi}{2}}{\sqrt{3} \left(1 - \mu \operatorname{ctg} \frac{\Phi}{2} \right)}. \quad (1)$$

На основе результатов моделирования с использованием методов статистической обработки данных получена МКЭ-аппроксимация, связывающая варьируемые параметры с величиной гидростатического давления на оси пересечения каналов:

$$p' = 1,584 - 0,641\Phi + 1,227\mu. \quad (2)$$

Здесь значение угла Φ подставляется в радианной мере.

Корректность соотношения (2) проходит статистическую проверку: адекватность предлагаемой модели гарантируется высоким показателем детерминации, превосходством эмпирического критерия Фишера над теоретическим, а также близостью к нулю относительной погрешности сходимости. По результатам проверки выражение (2) является пригодным для прогноза показателя p' .

Согласно соотношению (2), коэффициент трения выступает основным фактором, определяющим величину гидростатического давления в рассматриваемой области. Увеличение трения ведёт к росту p' , тогда как возрастание угла Φ вызывает его снижение. На этом фоне вклад угла Φ в падение данной величины менее значителен. Статистически значимого эффекта парного влияния угла пересечения каналов и условий трения не зафиксировано. Указанные выводы подтверждает рис. 1, где при оценке p' сопоставляются аналитическое решение (1) и МКЭ-аппроксимация (2).

Согласно рисунку 1, гидростатическое давление обнаруживает чувствительность как к углу наклона рабочего канала, так и к коэффициенту трения. Увеличение угла Φ с 90° до 120° приводит к снижению давления: при $\mu=0,05$ – с $0,64\sigma_s$ до $0,3\sigma_s$; при $\mu=0,3$ – с $0,95\sigma_s$ до $0,61\sigma_s$. Возрастание коэффициента трения с 0,05 до 0,3, напротив, сопровождается ростом давления: при $\Phi=90^\circ$ – с $0,64\sigma_s$ до $0,95\sigma_s$; при $\Phi=120^\circ$ – с $0,3\sigma_s$ до $0,61\sigma_s$. Таким образом, увеличение трения компенсирует потери давления, вызванные изменением

геометрии канала.

Сравнительный анализ аналитического (1) и численного (2) решений, (рис.1), позволяет установить области их соответствия и расхождения.

Процентное расхождение между двумя моделями расчёта величины давления в очаге деформации можно оценить по следующей формуле:

$$\delta p' = \frac{p'_2 - p'_1}{(p'_2 + p'_1)/2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где p'_1 – результат расчёта по аналитической модели (1), а p'_2 – результат расчёта по МКЭ-аппроксимации (2). Результаты вычислений для различных условий приведены в таблице 1.

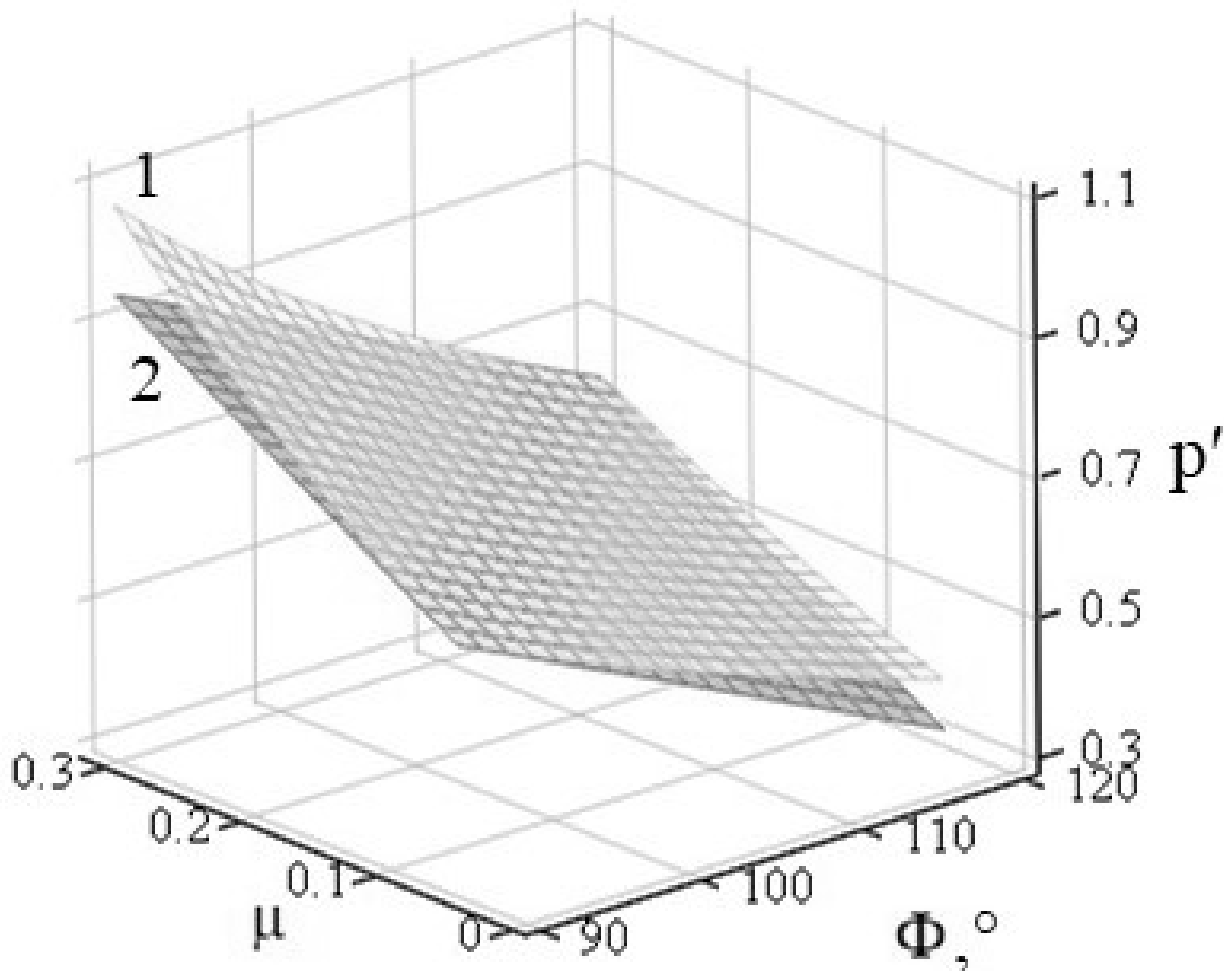


Рисунок – 1. Зависимость относительной величины гидростатического давления от коэффициента трения и угла пересечения каналов: сравнение аналитического подхода (1) и МКЭ-аппроксимации (2).

Таблица – 1. Сравнение аналитических и модельных расчётов относительного гидростатического давления вдоль оси пересечения каналов

Угол пересечения каналов	Значение коэффициента трения Амонтона-Кулона					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
90°	0,07	-0,61	-2,38	-4,96	-8,31	-12,43
95°	-0,09	-0,07	-0,97	-2,68	-5,15	-8,34
100°	-1,27	-0,37	-0,34	-1,19	-2,80	-5,11
105°	-3,78	-1,59	-0,56	-0,49	-1,23	-2,69
110°	-7,44	-3,86	-1,68	-0,61	-0,45	-1,05
115°	-12,70	-7,38	-3,84	-1,64	-0,49	-0,20
120°	-20,07	-12,48	-7,24	-3,69	-1,43	-0,16

Максимальные расхождения, превышающие с одной стороны 20% и 12% – с другой, объясняются разными механизмами деформации, которые учтены с использованием МКЭ: увеличение трения при малых углах канала расширяет очаг деформации с возникновением веерной зоны, в то время как рост угла Φ способствует образованию углового зазора.

Качественное совпадение моделей наблюдается вдоль центральной диагонали, где поверхности решений на рис. 1 накладываются друг на друга, визуально очерчивая пространство их сходимости. Это же подтверждается табл. 1, где вдоль той же диагонали расхождения минимальны. Эта область отвечает условию полного заполнения канала до момента зарождения веерной зоны, что обеспечивает практически полную сходимость аналитических оценок с конечно-элементной аппроксимацией.

Выводы

Методом конечных элементов установлены количественные зависимости совместного влияния угла пересечения каналов и коэффициента кулоновского трения на величину гидростатического давления процессе РКУП. Предложена эмпирическая расчетная модель, учитывающая совокупное действие указанных факторов. Показано, что варьирование указанных факторов в диапазоне угла 90°-120° и коэффициента трения 0,05-0,3 приводит к изменению гидростатического давления на оси пересечения каналов в 1,5-2,0 раза. При этом снижение давления от увеличения угла наиболее выражено в условиях низкого трения, а рост давления от повышения трения сильнее проявляется при большем угле 120°.

Сравнение аналитического подхода и конечно-элементной аппроксимации показало, что учёт режимов течения материала уменьшает погрешность оценки гидростатического давления на оси пересечения каналов до 20% по сравнению с классической моделью В.М. Сегала.

Литература:

1. Valiev, R.Z. Ultrafine-Grained Materials / R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, M. Kawasaki, T.G. Langdon. – Cham: Springer International Publishing, 2025. – 170 p.
2. Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
3. Segal, V.M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion / V.M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 2003. – V. 345. – P. 36-46.
4. Спусканюк, В.З. Влияние условий равноканального углового прессования на скорость деформации заготовок / В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 4. – С. 135-147.
5. Nagendra Singh, Kumar Agrawal, The effect of tooling design and properties of materials on fracture and deformation through equal channel angular pressing technique. MATEC Web of Conferences 392, 01030 (2024).
6. Мирошниченко, С. В. Численное исследование гидростатического напряжения в зоне пластической деформации при равноканальной угловой экструзии. Влияние угловых параметров / С. В. Мирошниченко, А. Н. Гангало // Физика и техника высоких давлений. – 2025. – Т. 35, № 4. – С. 150-157.
7. Утяшев, Ф.З. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб, В.А. Валитов. – СПб: Наукоемкие технологии, 2020. – 185с.
8. Гангало, А.Н. Исследование влияния геометрии рабочего канала на гидростатическое давление в процессе равноканального углового прессования / А.Н. Гангало, С.В. Мирошниченко // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 2 (122). – С. 50-61.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ РОМБИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ В КВАДРАТНОМ КАЛИБРЕ

Чабан М.Р., Скляр В.А.

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

Величина уширения – это один из основных параметров при расчёте режимов обжатий и калибровки валков процессов сортовой прокатки. От точности его вычисления зависит точность определения геометрических размеров полосы и калибров. Система калибров ромб-квадрат используется как в последних проходах сортовых станов для получения чистового квадратного профиля, так и в виде вытяжных калибров, в основном на заготовочных станах [1].

Изучение данной системы предусмотрено в одной из лабораторных работ на кафедре ММ им. С.П. Угаровой СТИ НИТУ «МИСИС». В связи с чем возникает вопрос применимости существующих методик определения параметров уширения к лабораторным условиям.

В различных источниках можно найти разные подходы к определению величины уширения при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре.

В учебном пособии [2] для определения величины уширения при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре предложено использовать номограммы. Однако минимальный размер валков, для которого составлены номограммы, составляет 250 мм, в то время как лабораторный стан имеет диаметр валков 100 мм.

Возможно добавление в формулы для расчета уширения при прокатке на гладкой бочке коэффициента k_{ϕ} , который для системы ромб-квадрат составляет 0,8...0,85 [3]. Однако такой подход является приближенным.

Существуют более точные подходы к вычислению уширения в калибрах [4, 5], однако данные методики достаточно сложные и трудно применимы для расчётов на лабораторных работах.

Цель данной работы заключается в получении уточненной формулы для расчета уширения в системе калибров ромб-квадрат в условиях лабораторной работы.

Исследование проводили на лабораторном стане с диаметров валков 100 мм, калибровка валков показана на рисунке 1. Образцы изготавливались из пластилина трех степеней прочности: твердый, мягкий и средней твердости, поскольку сопротивление деформации также влияет на величину уширения [6]. Ширина образцов составляла 10, 12 и 14 мм, относительное высотное обжатие 5, 9 и 13 %. Всего было изготовлено 18 образцов с различным сочетанием факторов по схеме неполного факторного эксперимента.

Полученные зависимости (рисунок 2) показывают рост относительного

уширения с повышением относительного высотного обжатия, что соответствует известным теоретическим и экспериментальным данным.

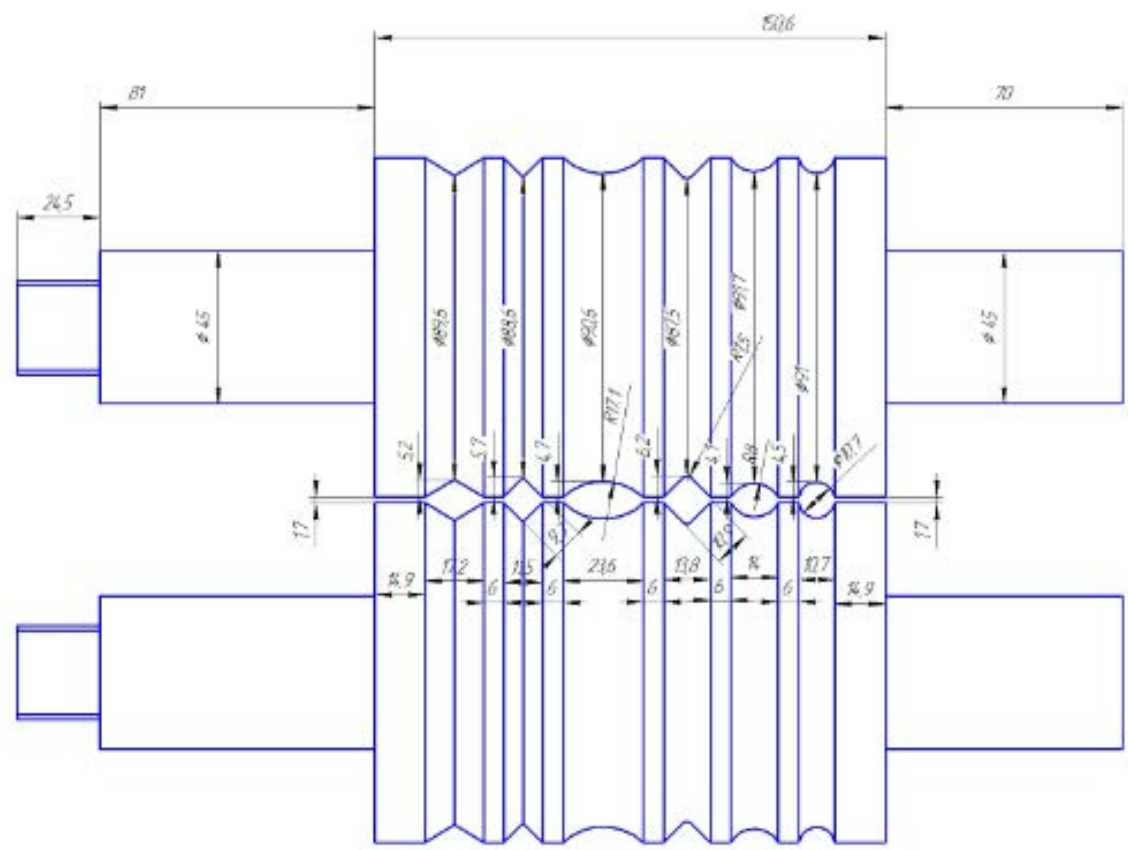


Рисунок 1 – Калибровка валков стана 100 для прокатки простых профилей

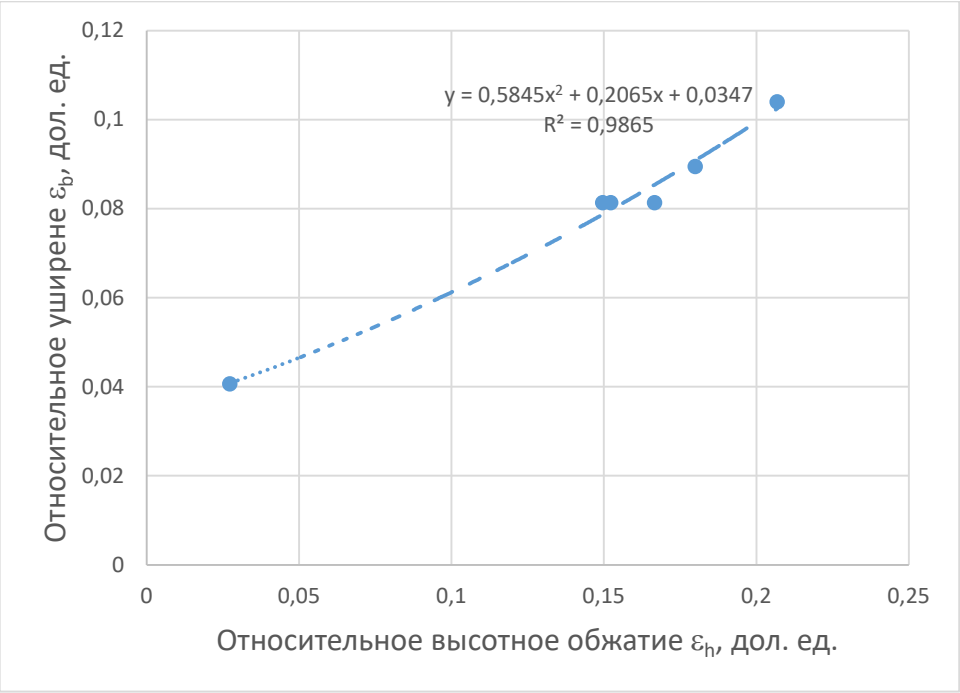


Рисунок 2 – Зависимость относительного уширения от относительного высотного обжатия при ширине образца 12 мм

Однако, следует заметить, что при ширине образцов 14 мм и высоких степенях обжатия наблюдалось переполнение калибра, что заметно из рисунка 3. Данные результаты были исключены из итоговой таблицы для регрессионного анализа как не релевантные.

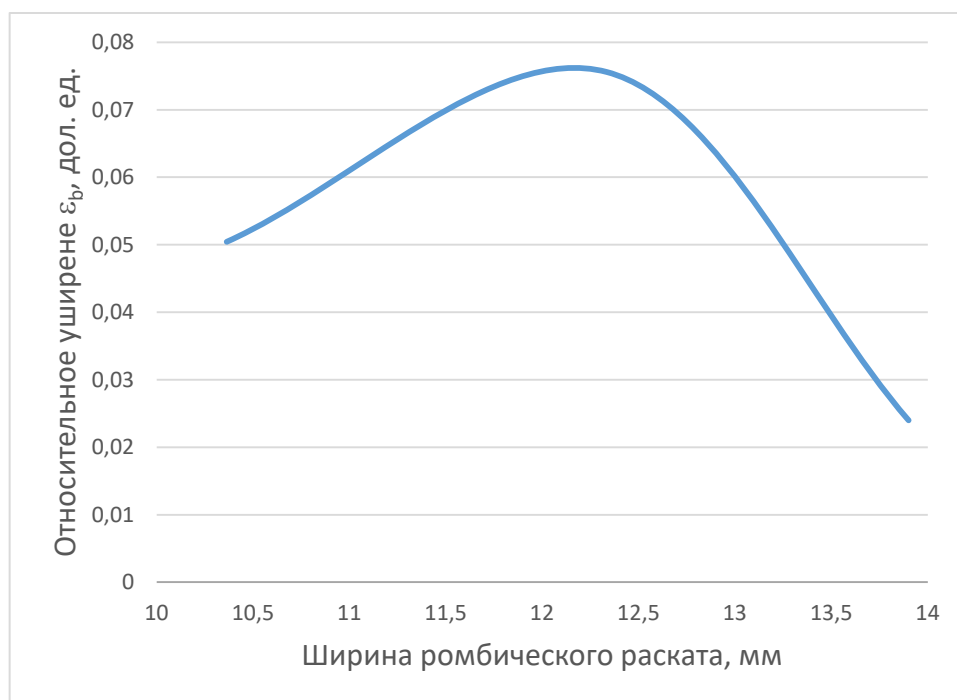


Рисунок 3 – Зависимость среднего относительного уширения от ширины образца

Величина среднего относительного уширения увеличивается при росте сопротивления деформации пластилина (рисунок 4), данные о котором взяты из работ [7, 8]. Данный факт тоже хорошо согласуется с известным теоретическим и экспериментальными данными [9].

Выполненный регрессионный анализ позволил получить регрессионную зависимость, которая может быть использована при расчете уширения в лабораторной работе.

Для удобства вычислений использовались два фактора: конечная ширина раската (диагональ квадрата) и вытяжка в квадратном калибре. Полученная зависимость для определения абсолютного уширения ромбической полосы в квадратном калибре имеет вид:

$$\Delta b = -7,929 + 8,460\lambda - 0,033b_1 \quad (1)$$

где λ – вытяжка в квадратном калибре;
 b_1 – ширина раската в квадратном калибре;

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,80$.



Рисунок 4 – Зависимость среднего относительного уширения от сопротивления деформации

В случае, если известно сопротивление деформации пластилина, то можно использовать следующую зависимость:

$$\Delta b = -7,985 + 8,439\lambda - 0,030b_1 + 0,927\sigma_s \quad (2)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,80$.

Сравнение расчетных данных, полученных по формуле (2) с реальными, полученными ранее в ходе лабораторных работ (таблица 1) показывает, что расхождение не превышает 10 %, что следует считать приемлемым для данных условий.

b_1 , мм	λ	σ_s , МПа	$\Delta b_{\text{расчетное}}$	$\Delta b_{\text{экспериментальное}}$	разница, %
10	1,12	0,02	1,18	1,1	6,82926512
11,1	1,14	0,02	1,31	1,2	8,813451036
10,7	1,08	0,02	0,82	0,9	-9,5126617

Таким образом, было исследовано влияние геометрических параметров полосы, степени обжатия и сопротивления деформации на уширение ромбической полосы в квадратном калибре. Получена регрессионная зависимость, которая будет использоваться при расчетах уширения ромбической полосы в квадратном калибре при выполнении лабораторной работы по дисциплине «Технология производства проката».

Литература:

1. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства : учебное

пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев. - изд. 5-е, стереотип. - Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 525 с.

2. Чекмарев, Калибровка прокатных валков : учебное пособие для вузов / А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машковцев. - М. : Металлургия, 1971. - 508 с.

3. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки : учебник для вузов / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. - М. : Металлургия, 1980. - 318 с.

4. Шишко, В.Б. Основы калибровки валков сортовых прокатных станов. Учеб. пособие / В.Б. Шишко, В.А. Трусов, Н.А. Чиченёв. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 247 с.

5. Минкин, А.В. Расчет систем вытяжных калибров: 2-е изд., доп. и перераб / А.В. Минкин. - М.: Металлургиздат, 2011. 264 с.

6. Клименко, В.М. Кинематика и динамика процессов прокатки : [Учеб. пособие для вузов по спец. "Обраб. металлов давлением"] / В. М. Клименко, А. М. Онищенко. - Москва : Металлургия, 1984. - 232 с.

7. Серегин, М. С. Исследование процесса прокатки коррозионностойких биметаллов / М. С. Серегин, В. А. Складар // Металлургия XXI столетия глазами молодых : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 28 мая 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 89-93.

8. Исследование прочностных свойств пластилина для моделирования процессов обработки металла давлением / В.А. Складар, Д.Б. Парпиев, З.А. Жамолиддинов // Лучшая научная работа 2022 : сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 января 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2022. – С. 52-56.

9. Кривенцов, А. М. Исследование и определение уширения при горячей прокатке в гладких и калиброванных валках / А. М. Кривенцов // Калибровочное бюро. – 2015. – № 6. – С. 6-39.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ ПРИ РОЛИКОВОЙ ПРАВКЕ

Ширкина. Е.С., Болобанова Н.Л.

Череповецкий государственный университет

В современном металлургическом производстве роликовая правка высокопрочных сталей, эксплуатируемых в низкотемпературных условиях, является критической операцией, от которой зависит не только товарная плоскостность проката, но и его эксплуатационная надежность при низких температурах. Эмпирическая настройка правильных машин (РПМ), приводит к неравномерной пластической проработке по ширине полосы, а также к неконтролируемому распределению остаточных напряжений.

Исследования роликовой правки листов и полос развиваются в двух основных направлениях: аналитическое и численное конечно-элементное моделирование, а также учет циклического характера нагружения.

В зарубежных работах [1–4] предложены унифицированные аналитические модели. В исследовании [1] введен ролико-полосовой элемент с виртуальными опорами и условиями статического трения. В работе [2] на основе интегрирования кривизны построена оптимизационная модель зазоров; показано, что при одинаковой упругой предельной кривизне оптимальные настройки совпадают для разных сталей. С использованием метода конечных элементов и комбинированной модели упрочнения в исследовании [3] изучена высокопрочная сталь S700MC и установлена важность учета остаточных напряжений наряду с плоскостностью. Аналитическая модель с контактной податливостью Герца в работе [4] описала облегание полосы вокруг ролика и колебательный характер остаточной кривизны.

В российских работах [5–9] акцент сделан на конечно-элементном моделировании. В исследовании [5] применена кинематическая модель упрочнения с учетом эффекта Баушингера для анализа остаточных напряжений; верификация по усилиям дала погрешность менее 10 %. Упрощенная двумерная конечно-элементная модель предложена в работе [6] и качественно подтверждена сравнением с аналитикой. В исследовании [7] исследованы законы настройки роликов: линейный, синусоидальный и другие, определены граничные факторы: условия захвата и прочности.

Таким образом, описанные исследования не учитывают влияния нижних опорных роликов на обеспечение качественной пластической проработки при устранении неплоскостности металла, в частности для хладостойкой марки стали с содержанием никеля 5%, что делает настоящую работу актуальной.

Конструктивной особенностью роликовых машин является возможность раздельной регулировки высоты опорных роликов нижнего ряда посредством гидродомкратов. Опорные ролики (рис.1) компенсируют упругий прогиб рабочих роликов, формируя их заданный профиль, который перераспределяет

контактное давление и напряжённо-деформированное состояние полосы по ширине.

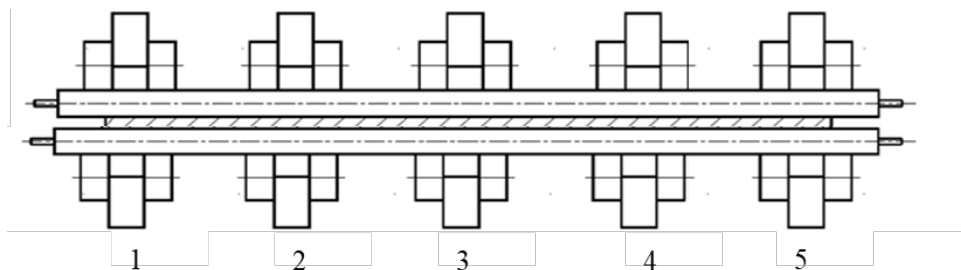


Рисунок 1 – Схема установки опорных роликов

Целью данной работы является исследование влияния конфигурации опорных роликов на напряженно-деформированное состояние (НДС) стали X12Ni5 при роликовой правке с применением конечно-элементного моделирования в среде DEFORM-3D.

Исследование выполнялось на фрагменте 13-роликовой правильной машины, включающем пять рабочих роликов, расположенных в шахматном порядке (рис. 2). Диаметр рабочих роликов $D = 180$ мм, шаг между роликами $t = 198$ мм. Верхняя кассета имеет возможность вертикального перемещения и последующей фиксации, нижние ролики зафиксированы. Для снижения вычислительных затрат использована половина полосы с заданием условий симметрии в поперечном направлении (плоскость XZ).

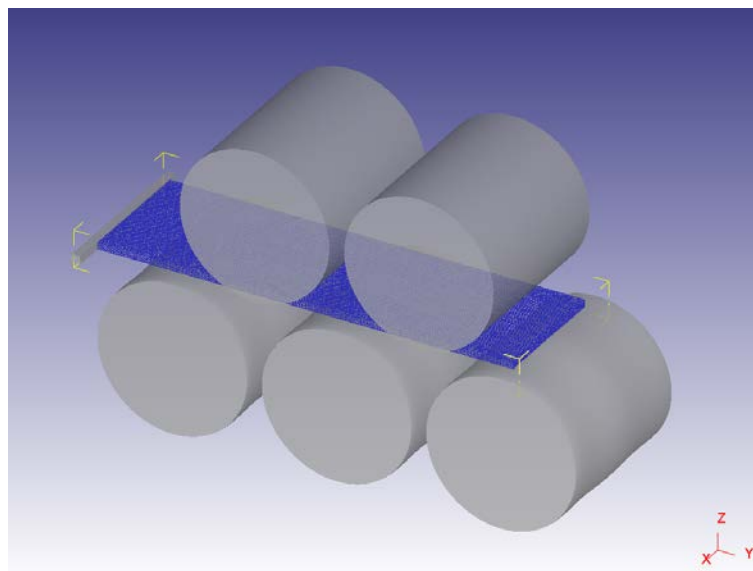


Рисунок 2 – Исходное положение модели

Рабочие ролики моделировались как абсолютно жесткие тела без теплопередачи; полоса – как упруго-пластическое. Контактное взаимодействие обновлялось при деформации и описывалось законом трения Кулона с коэффициентом $\mu = 0,12$.

Предметом моделирования являлась горячекатаная полоса из

высокопрочной криогенной стали марки X12Ni5 толщиной h 8 мм, со следующими физико-механическими свойствами: плотность материала $\rho = 7850$ кг/м³, модуль упругости первого рода $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести стали $\sigma_t = 390$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b = 710$ МПа. Кривая упрочнения задана в табличной форме на основе данных программного комплекса JMatPro.

Дискретизация полосы выполнялась тетраэдральными конечными элементами второго порядка. Общее количество элементов в модели составляло около 200 000, при этом в зоне контакта с роликами обеспечивалось не менее шести элементов по толщине полосы, что обеспечивает необходимую точность расчета изгибных напряжений и деформаций.

В работе рассмотрены три режима профилировки рабочих роликов, определяемые схемой установки опорных роликов (таблица 1):

Режим 1 – опорные ролики отсутствуют – профиль рабочего ролика представляет собой гладкую бочку;

Режим 2 – три опорных ролика, которые формируют выпуклость в центральной части рабочего ролика;

Компьютерное моделирование проводилось в несколько этапов:

1. Перемещение верхних рабочих роликов в рабочее положение с обеспечением заданных параметров настройки – зазора $g = 2,5$ мм и величины $\Delta = 5$ мм, характеризующей наклон кассеты;

2. Задание скорости полосы и скорости вращения рабочих роликов.

На втором этапе моделирования формируется стационарное поле остаточных напряжений и деформаций, определяющее конечное качество продукции. Оценка НДС выполнялась для двух зон: свободной (верхней) поверхности полосы и зоны контакта с третьим рабочим роликом.

В поперечном сечении контактной зоны выбраны контрольные точки: 1 и 7 – краевые, 4 – центральная, остальные точки равномерно распределены между ними. На свободной поверхности точки расположены аналогично: 8 и 14 – краевые, 11 – центральная, точки 9, 10, 12, 13 – промежуточные. Результаты моделирования второго этапа приведены на рисунках 3 и 4.

Сравнительный анализ распределения напряжений (рис. 3) выявил существенные различия между первым и вторым режимами деформирования. В свободной зоне (рис. 3, а) второй режим обеспечивает более равномерное распределение растягивающих напряжений по ширине полосы, тогда как для первого режима характерна их концентрация в центральной части. В зоне контакта с третьим роликом (рис. 3, б), в области максимальной деформации, особенностью второго режима является следующее: в центральной точке напряжения минимальны и не достигают предела текучести, тогда как на соседних участках, где степень деформации ниже, они возрастают. Это свидетельствует о сложном перераспределении напряжений в условиях контактного воздействия.

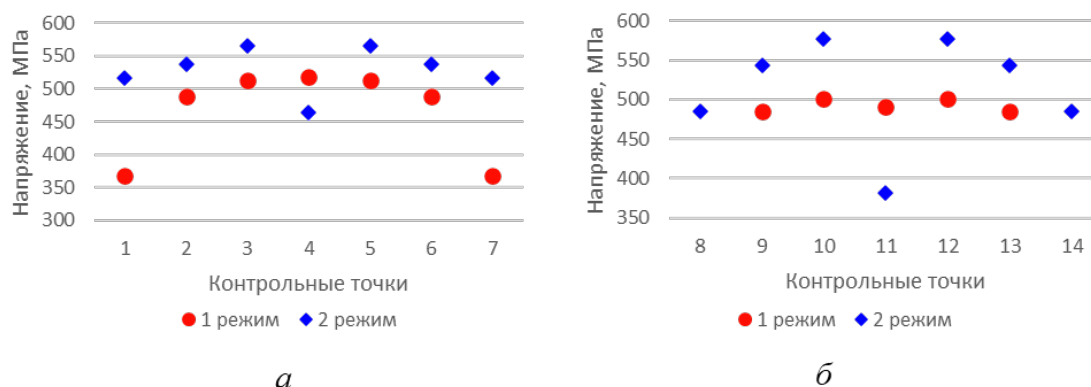


Рисунок 3 – Распределение интенсивности напряжения по ширине полосы:
а – на свободной поверхности, *б* – в контакте с 3 роликом

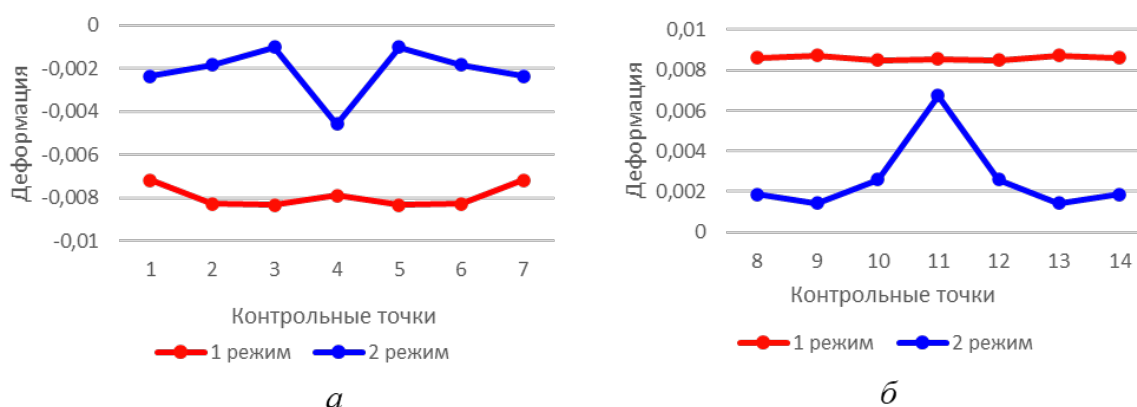


Рисунок 4 – Распределение интенсивности деформации по ширине полосы:
а – на свободной поверхности, *б* – в контакте с 3 роликом

Анализ графиков распределения продольных деформаций (рис. 4) показал, что симметричность кривых указывает на сбалансированное деформирование в зонах растяжения и сжатия. В областях с остаточными растягивающими напряжениями происходит преимущественное дополнительное удлинение металла, тогда как в зонах действия сжимающих напряжений деформация ограничивается контактным воздействием роликов. Этим объясняется более плавный характер распределения продольной деформации с повышенными значениями на первом графике (рис. 4, *а*) по сравнению со вторым (рис. 4, *б*). Сравнение режимов правки показало, что режим №2 обеспечивает интенсивную деформацию центральной области полосы, что способствует снижению градиента остаточных напряжений по ширине полосы, тогда как при режиме №1 деформация распределяется более равномерно по ширине, без ярко выраженной локализации в центре.

На основе конечно-элементного моделирования процесса роликовой правки полосы из хладостойкой стали установлено следующее:

1. Установлено, что воздействие опорных роликов (режим №2) по сравнению с режимом без опорных роликов (режим №1) обеспечивает более

равномерное распределение растягивающих напряжений на свободной поверхности полосы и целенаправленную интенсивную деформацию центральной зоны в области контакта с третьим рабочим роликом.

2. В режиме №1 наблюдается концентрация растягивающих напряжений в центральной части свободной поверхности при более равномерном распределении деформаций по ширине без ярко выраженной локализации, что делает его менее предпочтительным для управления остаточными напряжениями.

3. Симметричный характер распределения продольных деформаций свидетельствует о сбалансированном деформировании материала в зонах растяжения и сжатия, при этом в зонах остаточных растягивающих напряжений происходит дополнительное удлинение металла, а в зонах сжатия деформация ограничена контактным воздействием роликов.

В дальнейшем планируется рассмотрение более сложных конфигураций опорных роликов, обеспечивающих целенаправленное перераспределение деформации по ширине полосы и дальнейшее снижение остаточных напряжений.

Литература:

1. Yi G., Wang Z., Hu Z. A Novel Modeling Method in Metal Strip Leveling Based on a Roll-Strip Unit // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Article ID 1486864. – 16 p.

2. Liu Z., Luo Y., Wang Y., Liao T.W., Deng M. An analytical study of optimal roller intermeshes for the plate leveling process // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2020. – Vol. 235, No. 1-2. – P. 278-289.

3. Perzyński K., Pyzynski K., Swierczynski S., Pidvysots'kyi V., Klis J., Madej L. Influence of the roll leveler setup parameters on the quality of high-strength steel leveling operation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 120. – P. 1203-1217.

4. Kuo S.-K., Ou Y.-L., Wang D.-A. An Analytical Model for Stress and Curvature Prediction of a Strip Leveling Process // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, No. 5. – Article 757. – 18 p.

5. Котов К.А., Болобанова Н.Л., Нуштаев Д.В. Моделирование напряжений при правке горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 808-814.

6. Рудис А.М., Булков А.Б., Бабичев В.Г. Упрощённая КЭ модель правки листового металла в ролико-правильной машине // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2020. – № 6. – С. 712–718.

7. Грибков Э.П., Коваленко А.К., Ивчик Р.С., Титенко А.А. Исследование влияния настройки рабочих роликов на качество правки листового металлопроката // *Обработка материалов давлением*. – 2020. – № 1 (50). – С. 236–242.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ



ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАГОТОВКИ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Бакиров Д.Д., Рябов А.Д., Хлыбов А.А.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Современная промышленность, особенно химическая, атомная, пищевая и нефтяная отрасли, требует широкого применения аустенитных хромоникелиевых сталей. Благодаря легированию большим количеством хрома, никеля, титана и других элементов стали данного класса обладают рядом уникальных свойств: хорошая свариваемость, высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах, высокая пластичность и вязкость, а высокая термической устойчивости аустенитной структуры обеспечивает стабильный комплекс физико-механических свойств во время всего срока эксплуатации изделий [1-2].

Одним из перспективных методов получения изделий из аустенитных сталей является технология горячего изостатического прессования (ГИП). Изделия, полученные данным методом, имеют повышенные механические свойства за счет изотропной структуры и меньшего размера зерна [3]. Процесс ГИП заключается в консолидации металлического порошка в объемную заготовку путем одновременного воздействия на него высоких температур и изостатического давления в инертной среде. Главным преимуществом ГИП перед традиционными технологиями получения изделий является возможность получения заготовок, близких по геометрическим параметрам к размерам конечной детали, что способствует к повышению коэффициента использования материала [4]. Однако, в результате неоднородного распределения параметров ГИП (температуры и давления) по сечению заготовки в процессе ее изготовления, микроструктура и свойства заготовки меняются от периферии к центру. Такой градиент свойств материала может оказывать негативное влияние на дальнейшую эксплуатацию изделия.

Высокую структурную однородность по сечению заготовки после ГИП позволяет получить термическая обработка (ТО). ТО аустенитных сталей после ГИП также способствует повышению пластичности и вязкости, а также получению удовлетворительных показателей прочности.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния ТО на свойства и микроструктуру ГИП-заготовки из аустенитной стали 12Х18Н10Т.

На рисунке 1 представлены изображения микроструктур, полученных на различных расстояниях от края заготовки (периферии) после ГИП и после ТО.

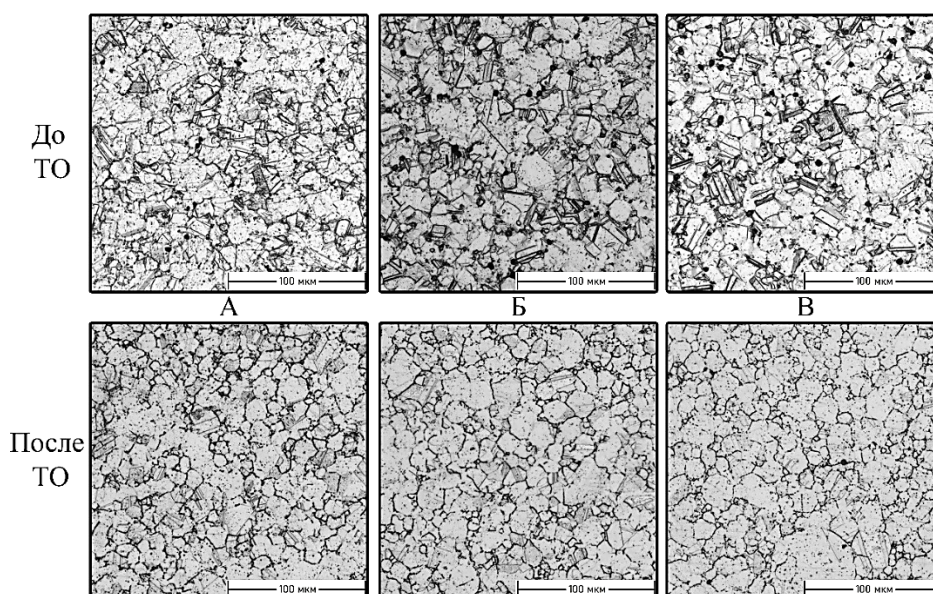


Рисунок 1 - Изображения микроструктур на расстоянии от края заготовки:
а - 5 мм, *б* - 10 мм, *в* - 15 мм

В заготовке после ГИП наблюдается увеличение количества двойников и размера карбидных включений, а также укрупнение зерна с увеличением расстояния от внешнего края. Повышенное давление в центральной части заготовки вызывает значительные деформации, что ведёт к росту числа двойников. Крупные карбидные включения и укрупнение зерна обусловлены замедленным охлаждением центра по сравнению с краями, а также продолжительным нахождением металла в зоне температур собирательной рекристаллизации.

Проведение ТО ГИП-заготовки из стали 12X18H10T позволила получить практически однородную структуру материала (сопоставимые размер зерна, размер карбидных включений и количество двойников) по всему сечению заготовки.

Распределение значений микротвердости в заготовке из стали 12X18H10T, полученной методом ГИП, характеризуется существенной неоднородностью (рис. 2а). Полученное среднее значение микротвердости стали 12X18H10T после ГИП - 218 HV.

В процессе ТО происходит структурная перекристаллизация и снятие остаточных напряжений после ГИП. В результате наблюдается снижение значений микротвердости и их выравнивание по сечению заготовки (рис.2б). Среднее значение микротвердости материала ГИП-заготовки после ТО – 190 HV.

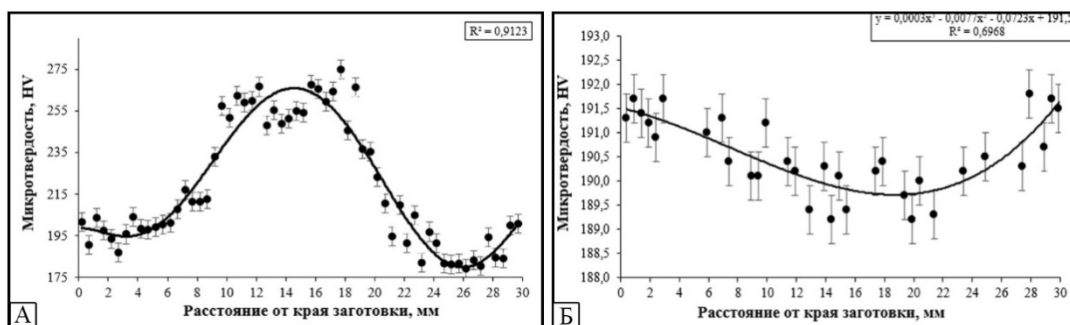


Рисунок 2 - Распределение микротвердости по сечению заготовки:
а – до ТО; б – после ТО

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. При ГИП заготовок из стали 12Х18Н10Т наблюдается значительное различие свойств между центром и периферией. Это обусловлено неравномерным распределением давления и температуры рабочего газа по сечению, что приводит к формированию неоднородной микроструктуры и физико-механических характеристик по объёму изделия.
2. Термическая обработка (закалка и старение) заготовки после ГИП инициирует полную перекристаллизацию сплава. В результате уменьшается объёмная доля пор, существенно повышается однородность микроструктуры, а также выравниваются физико-механические свойства по сечению заготовки.

Литература

1. Митрофанова Н. М. и др. Конструкционные материалы для оболочек твэлов и чехлов ТВС реактора БН-600 / Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №1. – С. 211-223.
2. Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей: монография / Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 720с.
3. Хлыбов А. А., Рябов Д.А., Аносов М.С., Беляев Е.С. Исследование особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 4–10. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-4-10
4. Hyoung Seop Kim. Densification mechanisms during hot isostatic pressing of stainless steel powder compacts // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – V. 123. – Is. 2. – P. 319-322. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00104-8.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ЗАЭВТЕКТОИДНОГО СОСТАВА НА КИНЕТИКУ РАСПАДА АУСТЕНИТА

Бессонова О.В.¹, Осколкова Т.Н.²

¹ Филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

² Сибирский государственный индустриальный университет

В настоящее время на железнодорожных магистралях России отмечается существенный рост грузонапряженности, включая горно-перевальные зоны и кривые малого радиуса, что обусловлено увеличением объемов грузовых перевозок, внедрением тяжеловесного подвижного состава и повышением интенсивности движения. Это приводит к ускоренному абразивному износу, развитию контактно-усталостных дефектов и снижению ресурса рельсов [1, 2]. Данные обстоятельства создают острую потребность в производстве рельсов из сталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками, способных выдерживать многократные циклические нагрузки на сложных профилях пути.

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа металла рельсов стали марки 90ХАФ двух исследуемых составов, условно маркированных № 1 и № 2, отличающихся друг от друга не только содержанием углерода, но и основными легирующими элементами (Cr, Mn) и микролегирующими добавками (V, N). Для указанных составов выполнено построение и анализ термокинетических диаграмм фазовых и структурных превращений, позволяющих определить оптимальные скорости охлаждения при термической обработке для формирования микроструктуры сорбитообразного перлита.

Химический состав металла рельсов составов № 1 и № 2 представлен в таблице 1.

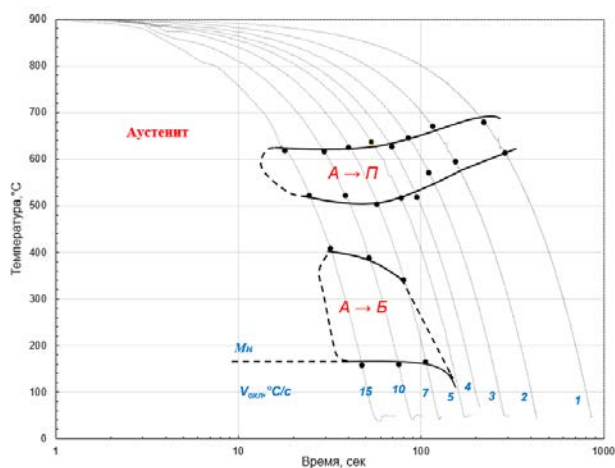
Таблица 1 – Химический состав исследуемых рельсовых сталей

Номер состава	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	N
1	0,87	0,54	0,79	0,29	0,08	0,13	0,002	0,08	0,010	0,012
2	0,91	0,43	0,82	0,34	0,14	0,11	0,002	0,10	0,010	0,016

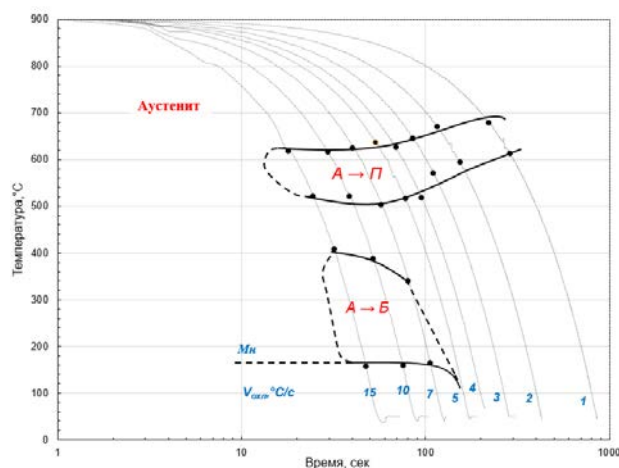
Сравнительный анализ химических составов показал, что наименьшее содержание углерода определено в рельсовом металле состава № 1, (ниже на 0,04 % по сравнению с составом № 2). Также следует отметить, что рельсовый металл состава № 2 отличается также повышенным содержанием хрома, никеля, ванадия и азота. Содержание молибдена в исследуемых составах находится на одинаковом уровне.

В рамках настоящей работы рельсы исследуемых составов подвергали дифференцированному упрочнению методом закалки сжатым воздухом. Для определения оптимальных скоростей охлаждения при термической обработке

на основании дилатометрических измерений, выполненных на закалочном дилатометре Linseis RITA78, исследовали влияние химического состава на распад аустенита при непрерывном охлаждении с построением соответствующих термокинетических диаграмм фазовых и структурных превращений для составов № 1 и № 2 (рис. 1). Температурные интервалы превращений стали исследуемых составов приведены в таблице 2.



а) состав № 1



б) состав № 2

Рисунок 1 – Термокинетические диаграммы распада аустенита при непрерывном охлаждении рельсовой стали состава № 1 (а) и состава № 2 (б)

Таблица 2 – Температурные интервалы превращений

Скорость охлаждения, °C/сек	Номер состава	Тип превращения			
		I ступень $A \rightarrow П$		II ступень $A \rightarrow Б$	Mn $A \rightarrow M$
		Начало	Окончание	Начало	Начало
1	1	634	582	-	-
	2	680	613	-	-
2	1	634	534	-	-
	2	671	594	-	-
3	1	632	491	-	-
	2	646	570	-	-
4	1	625	500	333	189
	2	626	519	-	-
5	1	598	526	328	180
	2	637	516	-	-
7	1	629	534	366	193
	2	625	503	341	165

По результатам анализа влияния химического состава на кинетику распада аустенита следует отметить, что карбидообразующие элементы и их

содержание существенно изменяют вид термокинетической диаграммы превращений [3]. Известно [4], что в сталях, легированных хромом, молибденом и ванадием, промежуточное превращение (бейнитное) смещается в область более низких температур, а между первой (диффузионной) и второй (промежуточной) ступенями появляется интервал относительной устойчивости аустенита. Это позволяет более эффективно управлять процессом охлаждения рельсов при термической обработке для формирования требуемой структуры.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2022 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» для обеспечения необходимого уровня механических свойств и ударной вязкости микроструктура головки термоупрочненных рельсов должна соответствовать структуре пластинчатого перлита дисперсностью не выше 4 балла по шкале 1 ГОСТ 8233, наличие мартенсита и бейнита стандартом не допускается. Таким образом, согласно данным термокинетических диаграмм, охлаждение рельсовой стали состава № 1 должно осуществляться более медленно, со скоростью не выше 2,5 °C/с, тогда как для рельсов состава № 2 допускается более интенсивное охлаждение – 2,5 – 3,0 °C/с.

Для термической обработки рельсов применяли дифференцированную закалку с тепла прокатного нагрева, обеспечивающую интенсивное локальное охлаждение сжатым воздухом поверхности катания головки и подошвы рельса, при этом остальные участки сечения охлаждались значительно медленнее за счет теплопроводности металла и конвективного теплообмена с воздухом. Поверхность катания головки рельсов опытных составов охлаждали со скоростями 2,3 °C/с (состав № 1) и 2,8 °C/с (состав № 2). Далее выполнили полный комплекс испытаний в соответствии с требованиями стандарта. В таблице 3 приведены результаты испытаний на растяжение, ударную вязкость, твердость поверхности катания головки рельса (ПКГ), а также параметры микроструктуры — межпластинчатое расстояние и диаметр зерна.

Таблица 3 – Механические свойства, ударная вязкость и параметры микроструктуры

№ соста ва	Механические свойства				КСU _{ср} , Дж/см ²	ТВ-ТЬ ПКГ, НВ	Параметры микроструктуры	
	σ _T , МПа	σ _B , МПа	δ, %	Ψ, %			МПР, мкм	Дз, мкм
1	930	1360	10,0	25	23,5	399	0,113±(0,020)	19,37±(3,61)
2	1013	1460	11,0	24	25,3	423	0,100±(0,014)	18,76±(3,93)

Оценку межпластинчатого расстояния (МПР) и диаметра зерна проводили на поперечных шлифах, изготовленных из зоны выкружки после электрополировки и травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования выполняли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan MIRA3. Контролируемая зона располагалась на расстоянии 2 – 4 мм от поверхности катания головки рельса.

Согласно данным таблицы 3 следует, что при одновременном увеличении содержания углерода, хрома и ванадия (состав № 2) наблюдаются более высокие значения ударной вязкости и прочностных характеристик при сопоставимом уровне пластических свойств. Это подтверждается меньшими значениями межпластинчатого расстояния перлита и диаметра зерна в микроструктуре металла рельса состава № 2. Твердость поверхности катания головки рельса (ПКГ), изготовленного из сплава № 2, превышает аналогичный показатель для состава № 1 на 24 НВ (5,6%).

В результате проведенного сравнительного анализа металла рельсов стали 90ХАФ двух составов (№ 1 и № 2), отличающихся содержанием углерода, основных легирующих элементов (Cr, Mn) и микролегирующих добавок (V, N), установлено, что повышенное содержание углерода, хрома, никеля, ванадия и азота в составе № 2 существенно влияет на кинетику распада аустенита. Построенные термокинетические диаграммы фазовых и структурных превращений выявили оптимальные скорости охлаждения при дифференцированной закалке сжатым воздухом: не выше 2,5 °С/с для состава № 1 и 2,5–3,0 °С/с для состава № 2, что обеспечивает формирование микроструктуры пластинчатого сорбитообразного перлита, соответствующей требованиям ГОСТ Р 51685-2022.

Металл рельсов состава № 2 отличается от состава № 1 более высокими значениями ударной вязкости, прочности и твердости поверхности катания головки (на 24 НВ выше, чем у состава № 1), при сопоставимой пластичности. Это обусловлено меньшим межпластинчатым расстоянием перлита и диаметром зерна в микроструктуре. Полученные результаты подтверждают эффективность дифференцированного упрочнения с учетом химического состава для повышения эксплуатационных характеристик рельсов.

Литература:

1. Санжаровский, А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния рельсового профиля / А.В. Санжаровский, Л.Н. Гудимова // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – №8. – С. 75 – 80.
2. Пенькова, А.О. Перспективы дальнейшего развития отрасли грузоперевозок в России железнодорожным транспортом / А.О. Пенькова // Молодой ученый. – 2020. – №8. – С. 294 – 296.
3. Егорова, Л.Ю. Влияние структурного состояния перлита на физико-механические и коррозионные свойства высокоуглеродистых сталей: автореф. дис. канд. техн. наук. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2014:23.
4. Юрченко, А.Н. Микроструктурные особенности, механические свойства и термическая обработка бейнитных сталей / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов // Вестник ПНИПУ. – 2016. – Т.18. – №3. – С. 160 – 181.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Иксанов Р.Р., Рябов А.Д., Хлыбов А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Сфера производства нуждается в постоянных изменениях, которые обосновываются современными реалиями. На данный момент производственные предприятия решают задачу поиска оптимальных технологических решений, которые сокращают сроки работы и расходы. Среди самых современных и эффективных технологий признают аддитивные технологии (АТ). АТ представляют собой полностью автоматизированный процесс позволяющий по цифровой модели получать изделия сложной конфигурации за одну операцию с минимальными технологическими отходами [1].

Аустенитные нержавеющие стали - распространенный класс материалов, находящий применение в различных областях промышленности. Они обладают низкой обрабатываемостью в виду сложности удаления стружки, деформационного упрочнения, низкой теплопроводности, поэтому имеет смысл применять печать для изготовления продукции из аустенитных сталей, но изделия полученные методами АТ обладают комплексом физико-механических характеристик отличным от изделий, полученных традиционными методами [2-3].

Аустенитные хромоникелевые стали, как известно, обнаруживают склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) при одновременном воздействии на сталь растягивающих напряжений и коррозионной среды что является значимой проблемой [4].

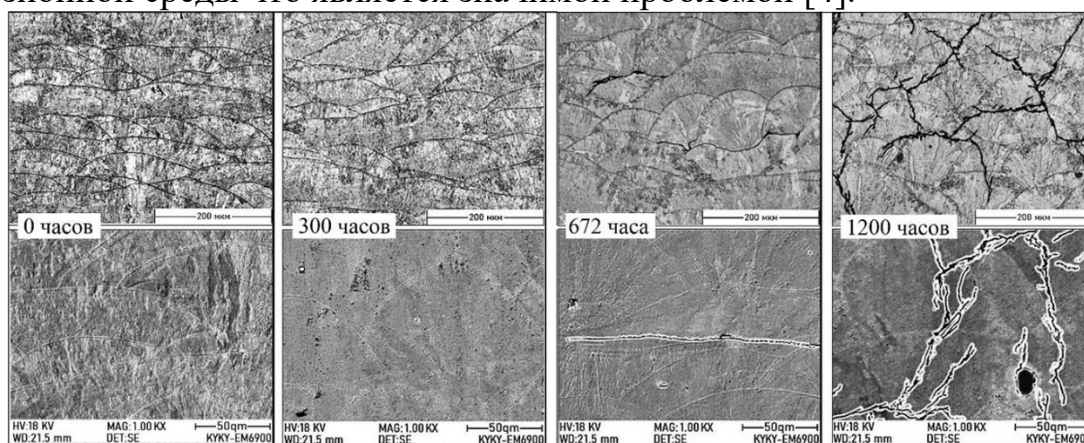


Рисунок 1 - Микроструктуры образцов в контролируемой зоне после испытаний

Таким образом, целью данной работы является изучение зависимости физико-механических характеристик образцов из стали 12Х18Н10Т, полученных методом селективного лазерного плавления, от степени

поврежденности материала в условиях КРН и оценка возможности применения методов неразрушающего контроля для диагностики данных изделий.

Результаты микроструктурного анализа представлены на рисунке 1.

При анализе микроструктуры на первом образце (300 ч) была обнаружена незначительная питтинговая коррозия, на втором (672 ч) питтинговая и межкристаллитная коррозия, а также локальное растрескивание. На третьем образце (1200ч) наблюдается множественная межкристаллитная, питтинговая коррозия и развитое растрескивание во всех направлениях.

На рисунке 2 представлена зависимость изменения акустического параметра D_c и содержания магнитной фазы в зависимости от времени выдержки при испытании.

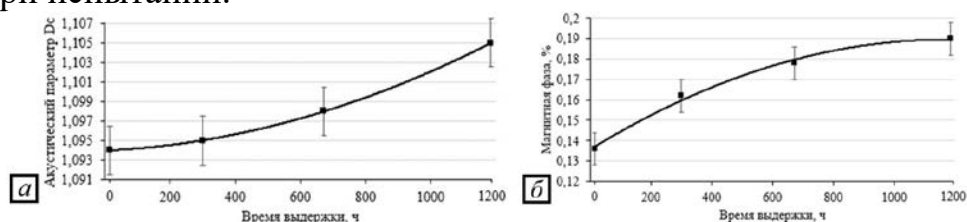


Рисунок 2 - Зависимость акустического параметра D_c (а) и содержания магнитной фазы (б) в зоне максимальных растягивающих напряжений от времени испытания

Полученные данные демонстрируют монотонное увеличение содержания α' - мартенсита деформации с ростом времени выдержки в условиях КРН. За 1200 часов испытаний доля магнитной фазы возросла на 0,054 об.% (относительно исходного уровня – на 39,4%).

Акустический параметра D_c показывает монотонный рост с увеличением времени выдержки в условиях КРН. За 1200 часов испытаний D_c возрос на 1,01%. Наиболее интенсивный рост наблюдается в интервале 672 – 1200 часов выдержки.

Литература

1. Сухочев, Г.А. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке про-изводства наукоемких изделий / Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев // – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2018. – 172 с.
2. Федосеева, Е.М., Олышанская Т.В., Душина А.Ю. Закономерности формирования структуры в механизмах кристаллизации аустенитных сталей (обзор) // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 83–97. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.09
3. Дресвянников, В.А. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования / В. А. Дресвянников, Е. П. Страхов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2 (26). – С. 16–28.
4. JIN, Z. H. et al. Corrosion behaviour of 316L stainless steel and anti-corrosion materials in a high acidified chloride solution. Applied Surface Science, v. 322, p. 47–56, 2014.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА SUPER DUPLEX 25Cr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Кириллова А.Н., Рябов Д.А., Хлыбов А.А.

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Аустенитно - ферритные (дуплексные) стали, содержащие $\leq 0,03\%$ C, $\geq 25\%$ Cr, $\geq 3\%$ Mo и около 7% Ni, находят широкое применение в качестве конструкционных материалов теплообменного оборудования химических производств и опреснительных установок, а также опорных конструкций морских платформ [1 – 4]. Среди прочих, наибольшее распространение в промышленном производстве получила коррозионностойкая дуплексная сталь Super Duplex 25Cr, рекомендуемая для работающих в контакте с морской водой конструкций [5]. Однако высокая легированность (свыше 25% Cr и 3% Mo) приводит к заметному усложнению обработки давлением и литья такой стали из-за риска выделения вредных интерметаллидных фаз. Именно поэтому для изготовления ответственных деталей из Super Duplex 25Cr всё чаще применяют горячее изостатическое прессование (ГИП).

Горячее изостатическое прессование (ГИП) – это сложный технологический процесс, представляющий собой совместное воздействие на металлический порошок высоких давления и температуры, что позволяет получать заготовки и готовые изделия из различных сплавов с повышенными физико-механическими характеристиками материала [6 – 8].

В процессе ГИП материале могут появляться напряжения, приводящие к разрушению детали, а также возникать неоднородности из-за неравномерного распределения фаз феррита и аустенита, которые снижают коррозионную стойкость и пластичность. Поэтому после ГИПа необходимо проводить термическую обработку.

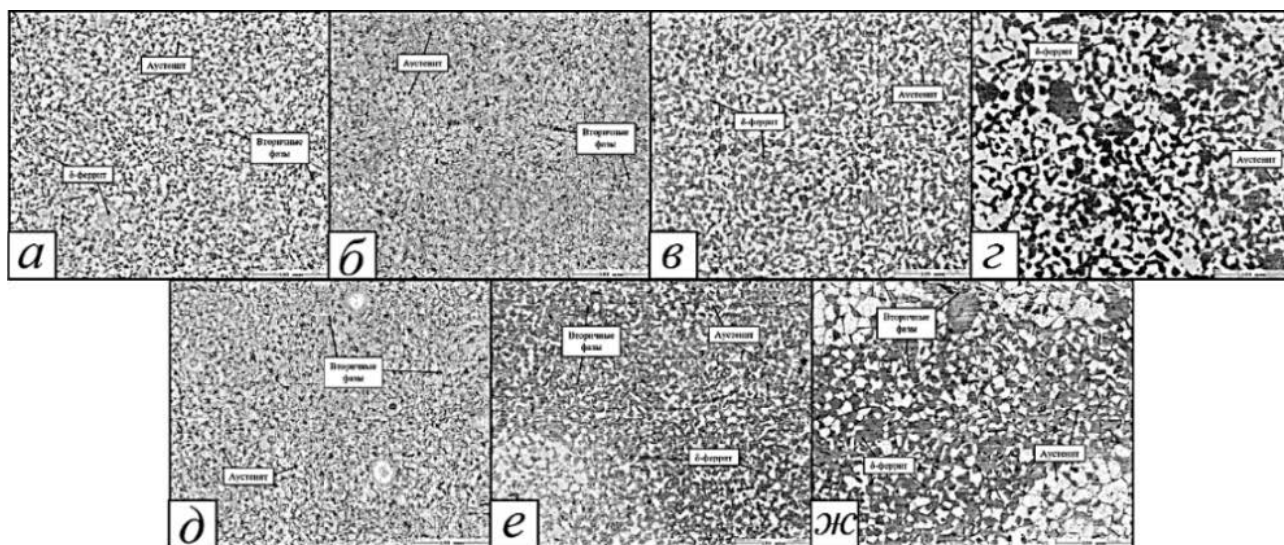
Вследствие чего целью настоящей работы является исследование влияния режима ТО на микроструктуру и комплекс физико-механических свойств образцов из сплава Super Duplex 25Cr, полученных методом ГИП.

Для оценки объемной доли и размера пор был проведен анализ в ПО Thixomet Pro. Проанализированные изображения и результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Объемная доля и средний диаметр пор в зависимости от режима ТО.

Режим ТО	Объемная доля пор, %	Средний диаметр пор, мкм
ГИП	0,86	7,5
Закалка 900°C	1,12	6,4
Закалка 1050°C;	1,37	26,1
Закалка 1180°C	6,74	27,3
Закалка 900°C и старение 650°C;	0,92	6,8
Закалка 1050°C и старение 650°C	0,96	16,7
Закалка 1180°C и старение 650°C	5,11	47,1

На рис. 2 представлена микроструктура исследуемых образцов после ГИП и различных видов ТО. Рис. 2 показывает, что структура сплава Super Duplex 25Cr после ГИП состоит из темных участков δ -феррита, светлых зерен аустенита, а также интерметаллидных вторичных фаз различной дисперсности.



a – после ГИП; *б* - закалка 900°C; *в* -закалка 1050°C; *г* – закалка 1180°C; *д* -закалка 900°C и старение 650°C; *е* - закалка 1050°C и старение 650°C; *жс* - закалка 1180°C и старение 650°C

Рисунок 2 - Микроструктура образцов из стали Super Duplex 25Cr

Были проведены оценка содержания ферритной фазы (СФФ), анализ плотности и твердости исследуемых образцов после различных режимов ТО и акустические измерения скоростей упругих волн. Результаты испытаний представлены ниже соответственно.

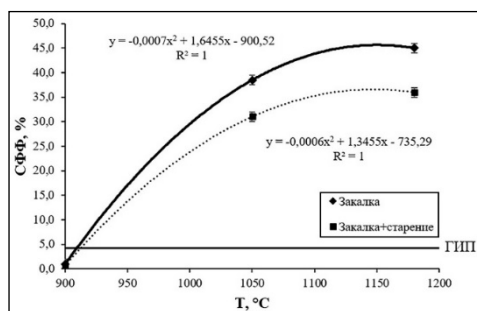
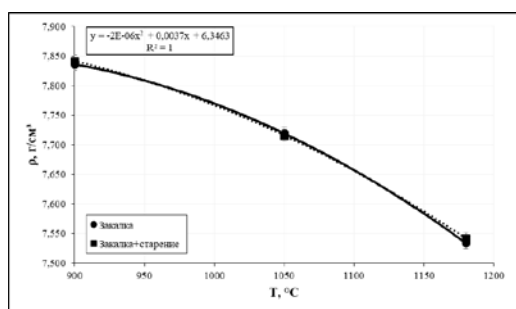
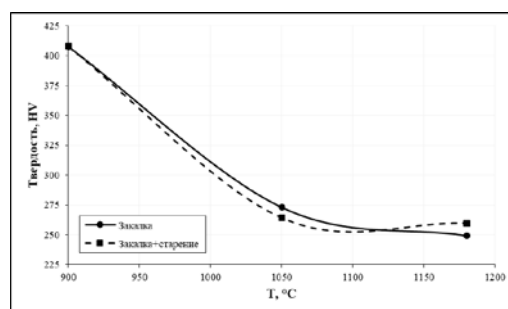


Рисунок 3 - Зависимость содержания ферритной фазы в образцах от режима ТО

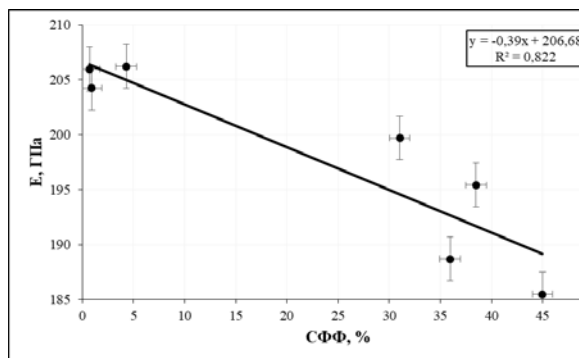


а

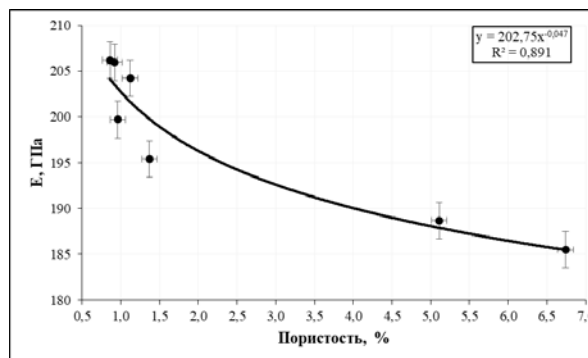


б

Рисунок 4 - Зависимость плотности и твердости исследуемых образцов в зависимости от режима ТО



а



б

Рисунок 5 - Зависимость модуля Юнга (а) и объемной доли пор (б) от СФФ в сплаве Super Duplex 25Cr

Таким образом, повышение температуры закалки сплава Super Duplex 25Cr от 900°C до 1180°C увеличивает содержание ферритной фазы (до 45%) и пористость (до 6,7%), что приводит к снижению твёрдости (с 408 до 249 НВ), модуля Юнга (до 187 ГПа).

Литература:

1. *Simekova B. et al. Microstructural and Mechanical Characterization of the Laser Beam Welded SAF 2507 Super-Duplex Stainless Steel / Šimeková, B.; Dománková, M.; Kovaříková, I.; Kovačócy, P.; Martinkovič, M.; Šimek, M.; Ciula, L. // Metals. 2024. V.14, P.1184. DOI: [10.3390/met14101184](https://doi.org/10.3390/met14101184)*
2. *T. Berecz, P. J. Szabo. Crystallographic relations during decomposition of the ferritic phase by isothermal ageing of duplex stainless steel Journal of Applied Crystallography // 2013. V. 46(1). P. 135-141. DOI: 10.1107/S0021889812044536*
3. *Казаков А.А., Житенев А.И., Федоров А.С., Фомина О.В. Прогнозирование перспективных составов дуплексных коррозионностойких сталей // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2020. Т. 63(3-4). С. 254-260. DOI: [10.17073/0368-0797-2020-3-4-254-260](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-254-260)*
4. *Зубченко А.С., Шарый Н.В., Рабинович В.П. Коррозионностойкая в морской воде аустенитно-ферритная сталь SAF 2507 (X2CrNiMoN 2574) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2014. №34. С. 42-52.*
5. *Зубченко А.С., Банюк Г.Ф. Перспективные для теплообменного оборудования аустенитно-ферритные хромоникелевые стали (краткий обзор) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2009. №25. С. 106-112.*
6. *Хлыбов А.А. и др. Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159 / Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 75-83. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83*
7. *Хлыбов А.А., Рябов Д.А., Аносов М.С., Беляев Е.С. Исследование особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, №4. С. 4–10. DOI: [10.22213/2413-1172-2021-4-4-10](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-4-4-10).*
8. *Magnus Ahlfors, Fouzi Bahbou, Anders Eklund, Ulf Ackelid. Hot isostatic pressing for additive production - improvement of the properties of the material // Mater. Res. Proc. 2019. V. 10. P. 1-10. DOI: 10.21741/9781644900031-1*

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФЕРРИТОВЫХ СВАРОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Милашин М.М., Мельниченко О.П., Фарафонтова А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработка технологии изготовления ферритовых сварочных стержней в условиях отечественного трубопрокатного производства в настоящее время является актуальной задачей, поскольку ферритовые сварочные стержни, полученные от зарубежных поставщиков не обеспечивают стабильность технологических параметров процесса высокочастотной сварки трубной заготовки, что влечёт за собой снижение качества выпускаемой продукции.

С целью оценки состояния ферритовых сварочных стержней в процессе эксплуатации проводились исследования их элементного химического состава различными методами, определялся фазовый состав и микроструктура.

Внешний вид ферритового сварочного стержня представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид ферритового сварочного стержня

Исследование микроструктуры материала стержней проводились методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе VEGA 3 XMH компании TESCAN с катодом из гексаборида лантана (LaB6). Изображения регистрировались детектором вторичных электронов при условиях съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, интенсивность пучка электронов 10-13 А, рабочее расстояние 6-22 мм. Химический состав фаз был определен системой Standard Aztec Energy / X-act с базовым безазотным детектором производства компании OXFORD INSTRUMENTS, с точностью массовой доли элементов 0,1 %.

Анализ фазового состава проводился методом порошковой рентгеновской дифракции (XRD) на дифрактометре Shimadzu XRD-6100, оснащенном Ni-фильтром для Cu-K α излучения ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) (диапазон $2^\circ 10-60^\circ$, скорость сканирования $4^\circ/\text{мин}$).

По результатам энергодисперсионной спектроскопии установлено, что основными химическими элементами входящими в состав порошкового материала для изготовления ферритовых сварочных стержней являются Fe, Mn, O, Ni, Zn, C. При проведении рентгеноспектрального микроанализа в различных участках образца установлено, что наиболее равномерное

распределение химических элементов во всех рассматриваемых образцах наблюдается для железа, кислорода и марганца. Углерод во всех рассматриваемых областях, исследуемых образцов распределён неравномерно. Наблюдаются участки, как равномерного распределения углерода, так и области его преимущественного скопления.

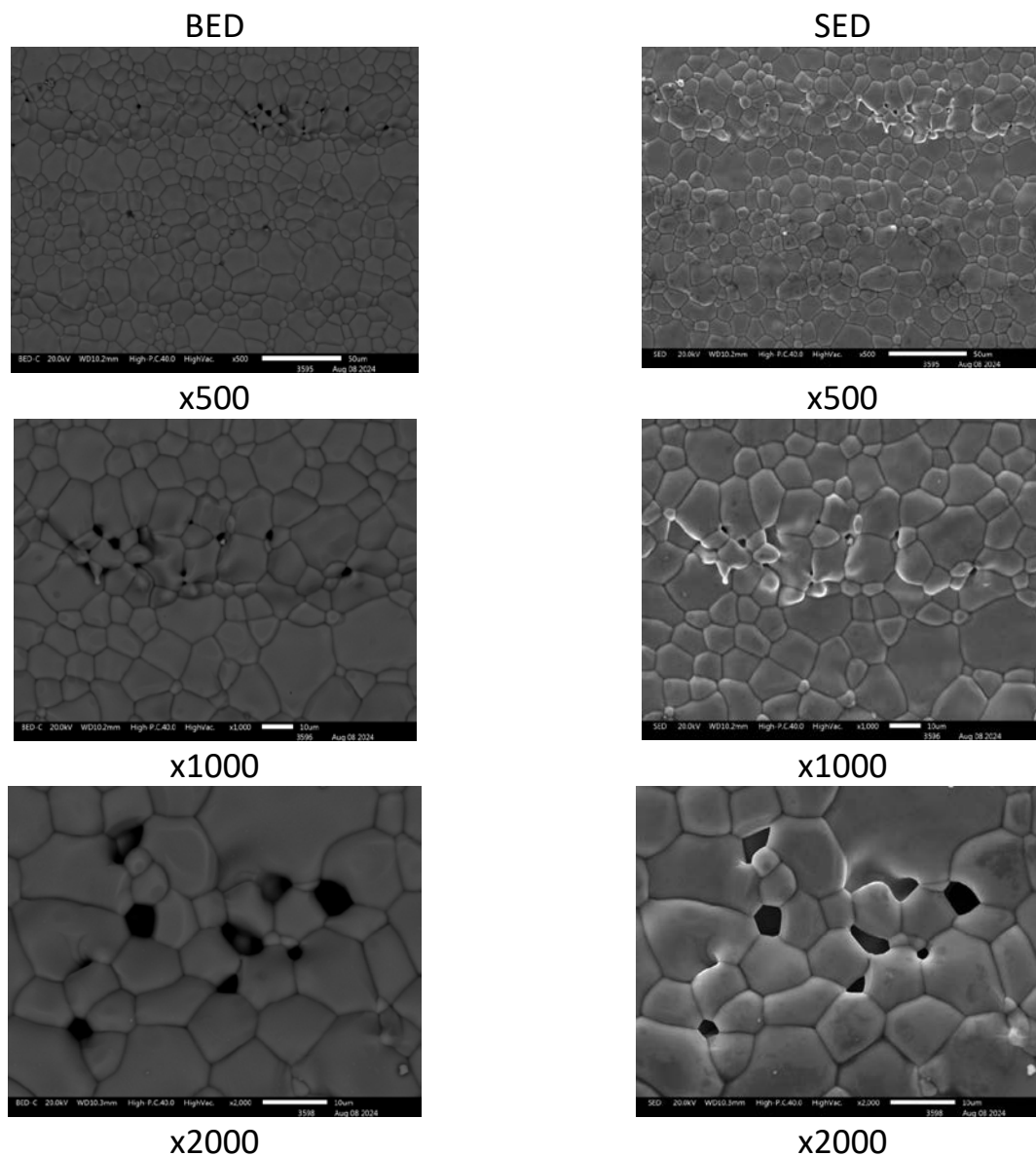


Рисунок 2 – Микроструктура ферритового сварочного стержня, полученная методом электронной микроскопии в обратно рассеянных электронах (BED) и во вторичных электронах (SED)

Анализ фазового состава позволил установить, что кристаллической фазой, находящейся в составе образца ферритового сварочного стержня является MnFe_2O_4 .

Проведённые исследования влияния температуры нагрева ферритовых сварочных стержней на их склонность к образованию трещин и разрушению показали, что нагревание материала стержней до температур от 600 °C и выше с

последующем охлаждении на воздухе до комнатной температуры приводит к образованию сетки трещин в материале стержней (рисунок 3).

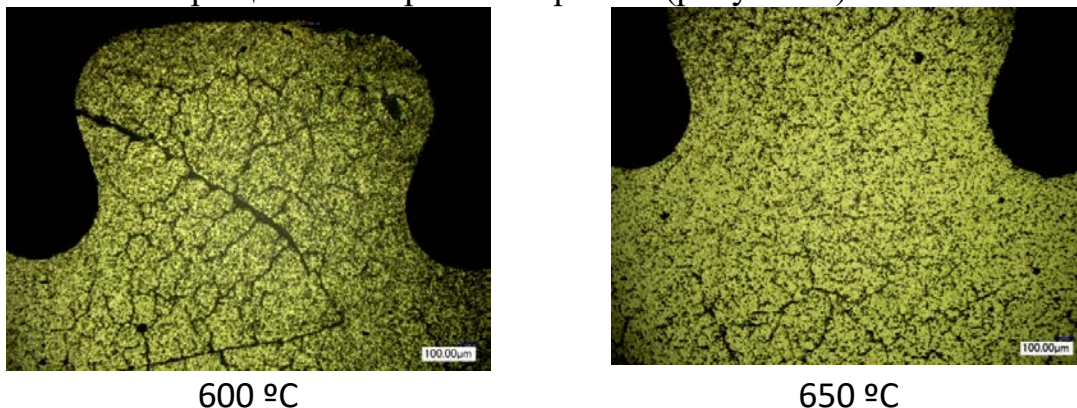


Рисунок 3 – Макроструктура поперечного сечения образцов ферритовых сварочных стержней после различных температур нагрева, x100

Таким образом, на основании проведенных исследований химического, структурного и фазового состава ферритовых сварочных стержней, учитывая специфику технологии производства изделий из порошковых материалов, можно сделать вывод о возможности их производства в условия отечественного трубопрокатного производства и оптимизации технологии их изготовления для достижения высоких технологических и эксплуатационных свойств.

Литература:

1. Фрактография и атлас фрактограмм: справ. изд./ под. ред. Феллоуза Дж. М.: Металлургия, 1982. 489 с.
2. Патент РФ № 2417268С1, 22.09.2009. Костишин В.Г., Кожитов Л.В., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Морченко А.Т. Радиопоглощающий феррит//Опублик. 27.04.2011. Бюл. № 12.
3. Поляков, А.А. Технология керамических и радиоэлектронных материалов. – М.: Радио и связь, 1989. – 200 с.: ил.
4. Левин Б. Е., Третьяков Ю. Д., Летюк Л. М. Физико-химические основы получения, свойства и применение ферритов. - М.: Металлургия, 1979.- 472 с.
5. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков: Пер. с япон. / Под ред. М. М. Багачихина и Л. Р. Зайонца. - М.: Энергия, 1976. - 336 с.
6. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. - 368 с.
7. Михайлова М. М., Филипов В. В., Муслимов В. П. Магнитно-мягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Под ред. А. Е. Оборонко. - М.: Радио и связь, 1983. — 200 с.
8. Тернауэр Х. Процессы керамического производства: Пер. с англ.- М.: ил. 1980.-460 с.
9. Летюк Л. М., Журавлев Г. И. Химия и технология ферритов. Л.: Химия, 256 с.1983.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Миронова А.В., Мельниченко О.П., Мясников А.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Управление структурой кристаллических материалов является наиболее эффективным средством для целенаправленного изменения их свойств.

Изучение фазовых превращений, протекающих в сталях, позволяет предсказывать неравновесные состояния, получаемые после различных способов термической обработки, и энергетических воздействий.

В литературе данный вопрос рассматривается как с позиции кинетики фазовых переходов сдвигового характера в стали в условиях действия магнитного поля [1-5], так с точки зрения обеспечения технологической прочности при лазерной сварке или наплавке изделий, учитывающей равномерность зоны лазерного воздействия, образование трещин и пор, а также формирования структуры зоны лазерного воздействия [6-12].

Установлено, что влияние стационарного магнитного поля на фазовые превращения при закалке возрастает с увеличением напряжённости магнитного поля. Изменение магнитных свойств γ -фазы связано с самопроизвольным возникновением флуктуаций дальнего ферромагнитного порядка («роев» спинов), которые представляют собой малые (однодоменные) ферромагнитные области (кластеры), возникающие и аннигилирующие по статистическим законам. Они возникают в микрообъёмах аустенита при достижении им температур выше точки Кюри в связи с его концентрационной неоднородностью. При наложении внешнего магнитного поля происходит дополнительное упорядочивание магнитных моментов, способствующих увеличению устойчивости и мгновенной концентрации ферромагнитно-упорядоченных участков. При наложении внешнего магнитного поля ферромагнитные кластеры, воспринимая его энергию, изменяют поле упругих сил, способствуя снижению энергетического барьера для образования зародышевого центра критического размера.

С позиции технологической прочности установлено, что воздействие постоянного магнитного поля в зонах лазерного воздействия на кристаллизующийся металл может значительно уменьшить неравномерность глубины его проплавления, уменьшить количество пор, возникающих из-за нестабильности сварочной ванны и газовых включений. Форма поля влияет на микроструктуру и свойства металла, позволяя эффективно воздействовать на его технологические свойства.

В приведенных источниках исследования по влиянию внешнего магнитного поля ориентированы на получение результатов при объёмной термической обработке материалов, но информации о формировании зон лазерного воздействия при локальной термической обработке стали крайне

мало, что обуславливает актуальность данной работы.

Целью являлась разработка технологии получения градиентных структурно-механических свойств в определённых областях обрабатываемого материала.

Для исследования воздействия магнитного поля на кинетику формирования микроструктуры использовались плоские образцы из стали 45 толщиной 3,5 мм после нормализации. Лазерная обработка осуществлялась с помощью лазерной установки ReciA200, установленной на роботеманипуляторе CRPRH20-06. Исследование микроструктуры проводилось с помощью оптического микроскопа KEYENCE VHX-1000. Исследование распределения микротвёрдости по сечениям исследуемых образцов осуществлялось на микротвердомере DuraScan 20G5. В качестве индентора использовалась алмазная пирамидка с квадратным основанием и углом при вершине 136° , нагрузка составляла 0,1 кгс (HV0,1). Величина **индукции магнитного поля определялась магнитометром МФ-24ФМ**, предназначенным для измерения остаточного магнитного поля ферромагнитных материалов.

В ходе работы исследовались зоны лазерного воздействия, полученные как без наложения внешнего магнитного поля при коаксиальной подаче газов в зону расплава – сжатого воздуха и азота, так и с магнитным полем при подаче азота в зону обработки. Параметры режима лазерной обработки исследуемых образцов подбирались таким образом, чтобы глубина усвоения материалом лазерного излучения составляла $\sim 0,6$ его толщины.

Влияние магнитного поля на механические свойства и структуру материала при его лазерной обработке исследовалось при использовании постоянных магнитов по схемам их размещения, представленным на рисунке 1.

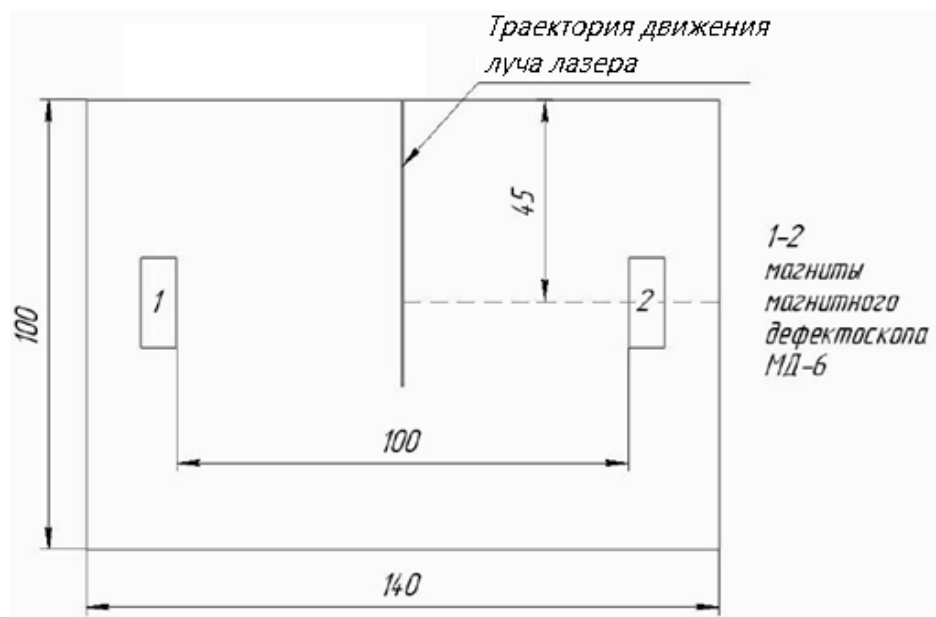
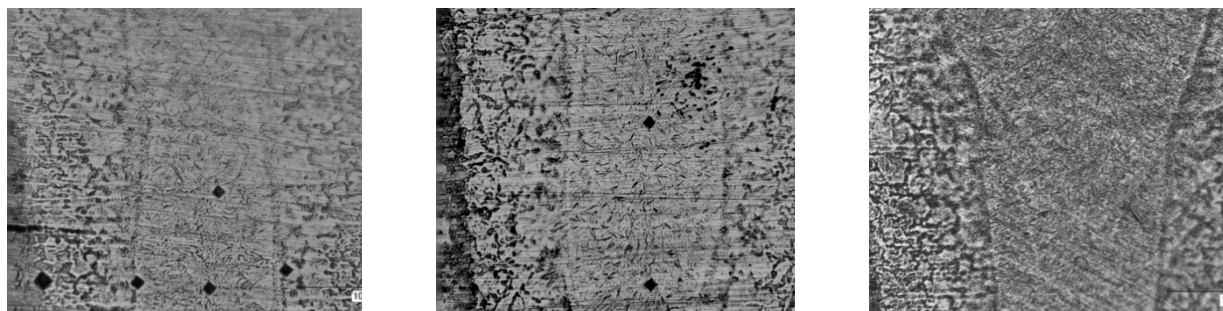


Рисунок 1 – Схема проведения лазерной обработки стали в магнитном поле



Средняя часть зоны лазерного воздействия



Нижняя часть зоны лазерного воздействия

В среде воздуха без
магнитного поля

В среде азота без
магнитного поля

В среде азота при
наложении внешнего
магнитного поля

Рисунок 2 – Микроструктура зон лазерного воздействия, сформированных при скорости перемещении лазерного излучения 80мм/с, х800

Согласно данным, представленным на рисунке 2, наличие внешнего магнитного поле оказывает непосредственное влияние на форму и размер зоны лазерного воздействия – глубина проплавления металла увеличивается на 0,167 – 0,202 мм, а ширина зоны лазерного воздействия - на 0,129 – 0,148 мм. Это объясняется повышенной концентрацией тепла в головной части канала за счет электромагнитных сил, воздействие которых препятствует оттеснению потоков жидкого металла в хвостовую часть.

Микроструктура зоны лазерного воздействия с наложением внешнего магнитного поля характеризуется большей дисперсностью структурных составляющих. Наблюдается наличие фазы, по морфологии близкой к нитридам, имеющей кубическую форму и характерный розово-красный оттенок, выявляемый после химического травления. Размер этих фазовых составляющих меньше, чем при формировании зон лазерного воздействия в среде азота без наложения внешнего магнитного поля.

Характер распределения микротвёрдости в зонах лазерного воздействия исследуемых образцов показывает, что твёрдость зоны лазерного воздействия, сформированной в среде азота, имеет большие значения, чем при лазерной обработке в среде воздуха. При использовании внешнего постоянного магнитного поля в среде азота достигаются наибольшие значения твёрдости исследуемой зоны на 70-100 HV 0,1.

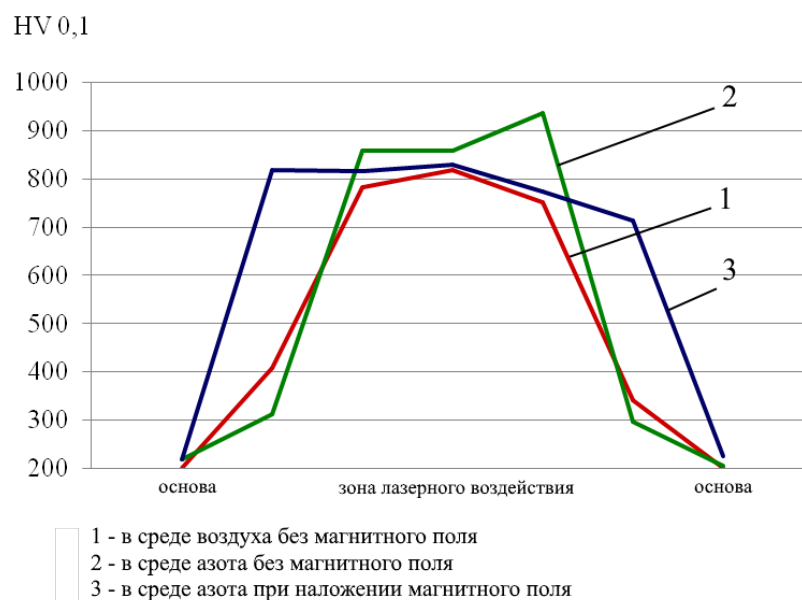


Рисунок 3 – Распределение микротвёрдости по ширине зон лазерного воздействия

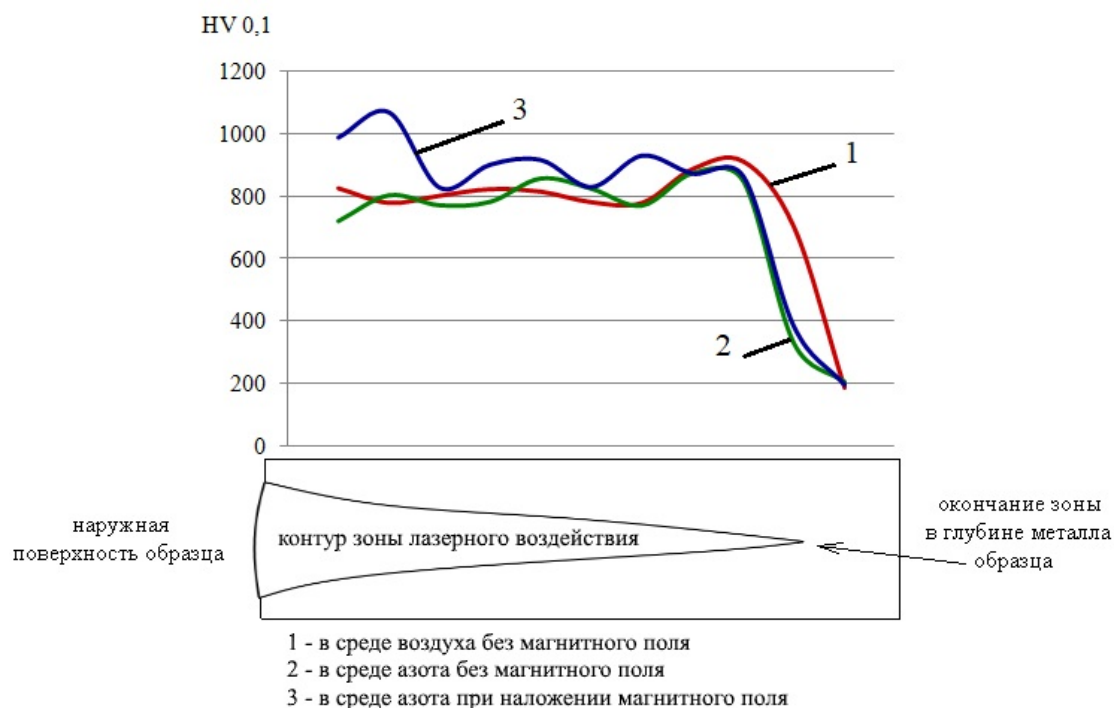


Рисунок 4 – Распределение микротвёрдости по глубине зон лазерного воздействия

Высокоэнергетическая обработка металлических изделий из углеродистой стали остросфокусированным лазерным излучением может использоваться для эффективного воздействия на материал с целью создания в нём градиентных структурно-механических свойств. При этом использование внешнего магнитного поля, приложенного к обрабатываемому изделию, совместно с воздействием газовой среды позволяет усилить степень дифференцирования структурно-фазового состояния между основным металлом и зоной лазерного воздействия за счёт

непосредственного влияния на процесс кристаллизации металла.

Литература:

1. Пустовойт В.Н., Долгачёв Ю.В. Исследование механизма образования зародышей мартенсита при закалке в магнитном поле. Упрочняющие технологии и покрытия, 2007. – №3. – С.4-7.
2. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Приходько С.В. Обзор механизмов образования ферромагнитной фазы в неферромагнитной матрице / Вестник науки №9 (9) том 1. – С. 240-241. –2018. – ISSN 2712-8849 / Электронный ресурс: <https://www.вестник-науки.pf/article/532>.
3. Пустовойт В.Н., Долгачёв Ю.В. Технология бездеформационной закалки в магнитном поле тонкостенных деталей кольцевой формы /Вестник Донского государственного технического университета, 2011. – Т. 11. № 7 (58). – С. 1064-1071.
4. Бернштейн М.Л. (1987) Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
5. Ромашев Л.Н. Магнитные свойства аустенита хромоникелевых сталей и мартенситное превращение под влиянием импульсного магнитного поля: Автореф. дис. канд. физ.- мат. наук. / Свердловск: ИФМ УНЦ АН СССР, 1977. – 22 с.
6. Qi Y., Chen G., Deng S., Zhou D. Periodic root humps in thick-plate laser welding us ingsteady electromagnetic force /J Mater Process Tech, 2019. –273. С. 116-247.
7. Huang, L., Liu, P., Zhu, S., Hua, X., & Dong, S. Experimental research on formation mechanism of porosity in magnetic field assisted laser welding of steel / Journal of Manufacturing Processes. 2020.
8. Chen J, Wei Y, Zhan X, Gu C, Zhao X. Thermoelectric currents and thermoelectric magnetic effects in full-penetration laser beam welding of aluminum alloy with magnetic field support / Int J Heat Mass Transf, 2018. – 127. – С. 332-44.
9. Chen J, Zhang Y, Wu C, Padhy G. Suppression of undercut defects in high-speed GMAW through a compound magnetic field / J Mater Process Tech, 2019. – 274. – С. 116-288.
10. Rong Y, Xua J, Cao H, Zheng H, Huang Y, Zhang G. Influence of steady magnetic field on dynamic behavior mechanism in full penetration laser beam welding/ J Manuf Process, 2017. – 26. – С. 399–406.
11. Huang L, Hua X, Wu D, Li F. Numerical study of keyhole instability and porosity formation mechanism in laser welding of aluminum alloy and steel / J Mater Process Technol, 2017. – 252. – С. 421–31.
12. Zixin Chen, Houming Zhou, Mingfu Li, Gaofeng Zhang, Caixing Xu, Fangjia He. Effect of magnetic field waveform on microstructure and properties of laser cladding / Materials Letters: X Volume 11, 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ МАРКИ 76ХФ С НОВЫМ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

Олифиренко И.А., Осколкова Т.Н.

Сибирский государственный индустриальный университет

В связи с увеличением осевых нагрузок, вводом тяжеловесных составов, повышением скоростей и интенсивности движения поездов, возникает потребность в рельсах, обладающих повышенными потребительскими показателями с улучшенными механическими свойствами и параметрами микроструктуры за счёт легирования или термообработки. В данной работе исследовали влияние химического состава на интенсивность износа и сопротивление к образованию дефектов контактно-усталостного характера в металле дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов.

Исследование проводили посредством физического моделирования процесса адгезионно-деформационного механизма трения на роликовой машине TR-25 системы ролик на ролике (Roller on Roller) методом трения – качения с постоянным проскальзыванием образцов, изготовленных из рельсов перлитного класса с различным содержанием углерода и марганца.

В качестве объекта исследования использовали термоупрочненные рельсы типа Р65 производства ПАО «ЕВРАЗ» филиал «Западно-Сибирский металлургический комбинат» с химическим составом, близким к эвтектоидному, из стали марки 76ХФ по ГОСТ Р 51685-2022

Результаты анализа химического состава, металла исследуемых образцов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей

Категория	Марка стали	Массовая доля элементов, %									
		C	Mn	Si	Cr	P	S	Al	V	Ni	Cu
Состав №1	76ХФ	0,76	0,78	0,55	0,42	0,013	0,007	0,004	0,03	0,08	0,15
		-0,80	-0,82	-0,60	-0,46	-0,018	-0,012	-0,008	-0,08	-0,12	-0,20
Состав №2	76ХФ	0,82	0,97	0,57	0,44	0,013	0,007	0,003	0,03	0,06	0,09
		-0,85	-1,04	-0,61	-0,48	-0,018	-0,012	-0,007	-0,08	-0,10	-0,12
Требования ГОСТ Р 51685-2022 для стали марки 76ХФ		0,71-0,84	0,75-1,25	0,25-1,00	0,20-0,60	Не более			0,03-0,15	<0,2	<0,2
						0,020	0,020	0,004			

Сравнительный анализ содержания химических элементов показал, что металл из рельсовой стали исследуемых образцов составов № 1 и 2 соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2022 для стали марки 76ХФ, но отличается по массовой доле элементов углерода и марганца, а также в незначительной степени по содержанию хрома, никеля и меди.

Результаты механических свойств, образцов от рельсов составов № 1 и 2 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства сталей исследуемых рельсов

Категория	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление разрыву, σ_b	Относительное удлинение, δ_5	Относительное сужение, ψ
	Н/мм ²		%	
Состав №1	902	1296	11,5	35,0
Состав №2	938	1361	12,5	35,0
Требования ГОСТ Р 51685-2022 для класса твердости 350	800	1180	9,0	25,0

Из данных, представленных таблицы 2, можно сделать вывод, что наибольшими прочностными характеристиками по показателям временного сопротивления разрыву (σ_b) и условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), обладали образцы, изготовленные из стали марки 76ХФ, с более высоким содержанием углерода и марганца (состав №2). Стоит также отметить, что образцы, изготовленные из рельсов состава №2, с повышением содержанием основных химических элементов имеют также более высокие значения относительного удлинения (δ_5) [1].

Поскольку твердость материалов и сплавов является одним из ключевых факторов, влияющих на износостойкость [2], провели измерения твердости металла исследуемых образцов по методу Виккерса на микротвердомере «Qness Q10A+» по 25 точкам по поверхности образцов при нагрузке 50 Н, средние результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3 –Твёрдость исследуемых образцов, НВ

Состав № 1	Состав № 2
376±7	393±6

Из представленных данных таблицы 3 видно, что наибольшей твердостью обладает рельсовая сталь состава №2 со средними значениями - 393 НВ, что выше на 17 НВ относительно рельсовой стали состава №1.

Для проведения лабораторных испытаний на роликовой машине TR – 25 с целью оценки износостойкости образцов из рельсов состава №1 и №2 были вырезаны образцы в соответствии с чертежом, представленным на рисунке 1, в качестве контактного ролика брали образец изготовленных из стали 9Х1 с твёрдостью около 60 HRC, в соответствии с чертежом представленным на рисунке 2.

Износостойкость определяли, как величину, обратную интенсивности износа. Из-за малой потери массы при испытании использовали лабораторные аналитические весы с точность до одной десяти тысячной. Графики зависимости износостойкости от количества циклов, на образцах приготовленных от рельсов состава №1 и №2, представлены на рисунке 3.

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{N_{об}} \cdot 10^{-5} \quad (1)$$

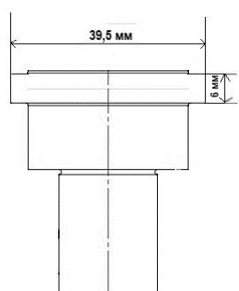


Рисунок 1 – Рельсовый образец

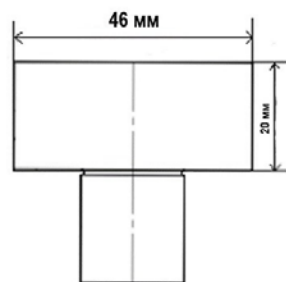


Рисунок 2 – Контактный ролик

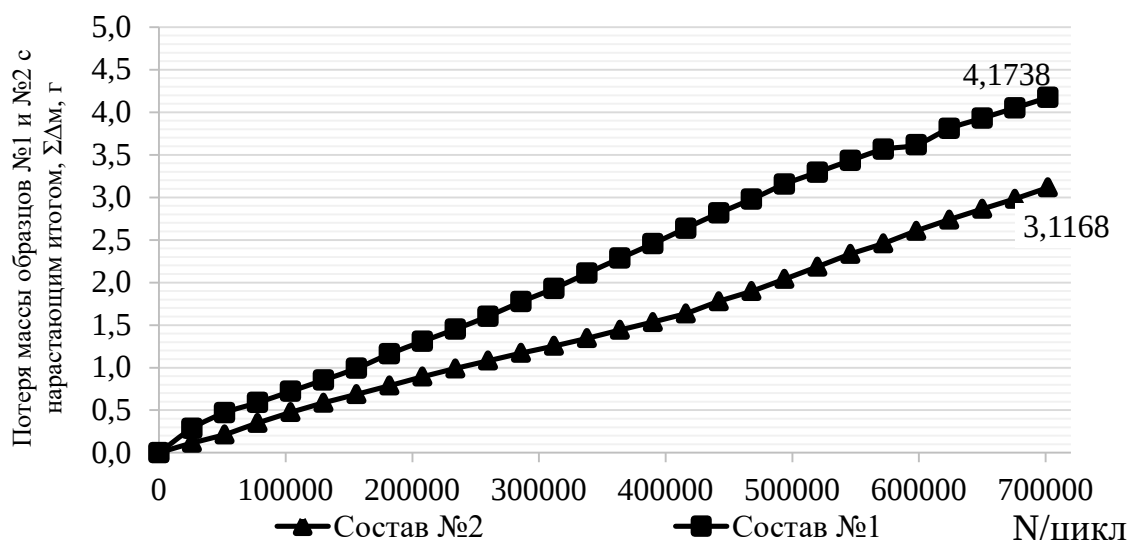


Рисунок 3 – Сравнительные значения потери массы с нарастающим итогом для рельсов состава №1 и №2

Исходя из представленных графиков видно, наиболее износостойкими были образцы, изготовленные из рельсов состава №2, где средний износ составил около 3,1168 г за 700 000 оборотов, при такой же стадийности наработки образцы из рельсов состава №1 составил 4,1738 г, что выше на 33,9% относительно образцов, изготовленных из рельсов состава №2.

По результатам проведенных экспериментов и исследований, установлено что средние значения твёрдости на образцах из рельсовой стали состава № 2 с повышенным содержанием углерода и марганца выше на 17 НВ, чем на образцах из стали состава № 1, при этом потеря массы образцов из рельсов состава № 2 ниже на 25,32%, чем на образцах из рельсовой стали состава № 1.

Литература:

1. Олифиренко, И.А.О результатах трибологических исследований железнодорожных рельсов / И.А.Олифиренко, Т.Н.Осколкова, Е.В.Полевой // Известия вузов. Черная металлургия. – 2024. – № 6. – С. 653 – 659.
2. Шур, Е.А. Как правильно сравнивать износостойкость различных рельсов. / Е.А. Шур // РСП-эксперт. – 2018. – № 1– 2. – С. 20 – 25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО — ДЕФОРМАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ПРАВКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Розуменко Д. А., Егоров Н.Т.

Донецкий национальный технический университет

Технологический процесс производства толстолистового проката представляет собой совокупность чередующихся процессов деформационного и термического воздействия на металл, в результате которых формируется определенное его структурное состояние и соответствующий уровень свойств.

В настоящее время достаточно хорошо изученными являются процессы горячей прокатки и термической обработки. Вместе с тем толстолистовой прокат в реальных условиях производства подвергается температурно - деформационному воздействию не только при горячей прокатке, но и в процессе его горячей и холодной правки [1, 2].

В данной работе приведены результаты исследований по изучению влияния температурно - деформационных условий правки толстых листов на механические свойства низколегированной стали 09Г2, поставляемой по ГОСТ 19282 и содержащей, %: 0,11C; 1,5Mn; 0,35Si; 0,025S и 0,016P.

Образцы размерами 30 x 300 мм, вырезанные из горячекатаных листов толщиной 14 мм производства Алчевского металлургического комбината, с целью устранения имеющегося различия в структуре горячекатаного металла, подвергали предварительной нормализации при температуре 920°C, а затем деформации растяжением на 1 - 10% при комнатной температуре с использованием разрывной машины.

Для изучения влияния температуры деформирования образцы нагревали в лабораторной печи до 920 — 930°C, выдерживали 20 мин., после чего подстуживали на воздухе до температур 20 — 700°C и подвергали растяжению со степенью деформации 1 и 3%, что соответствует реальным условиям деформации и температурам, которые могут наблюдаться при правке толстых листов в производственных условиях.

Механические свойства стали определяли при испытании на растяжение цилиндрических образцов диаметром 6 мм и расчетной длиной 30 мм. Испытание на ударный изгиб проводили на стандартных образцах типа 1 при температуре минус 40°C.

С увеличением степени холодной деформации от 1 до 10% прочностные свойства стали непрерывно возрастают при одновременном снижении ее пластичности и вязкости (таблица 1). В частности, временное сопротивление разрыву толстолистовой низколегированной стали 09Г2 увеличивается с 505 до 620 Н/мм², а предел текучести — с 345 до 590 Н/мм², в то время как относительное удлинение снижается с 32% до 19%, а ударная вязкость с 1,1 до 0,16 Мдж/м².

Таблица 1 — Влияние холодной деформации на механические свойства толстолистовой стали 09Г2.

Степень	σ_s	$\sigma_{0.2}$	δ	Твердость,	KCU $^{-40\text{ }^{\circ}\text{C}}$,
1	505	345	32	79	1,1
3	525	470	28	81	0,58
5	580	510	25	83	0,21
7	595	540	21	84	0,19
10	620	590	19	85	0,16

Влияние температуры и деформации растяжением на механические свойства исследованной стали приведены на рисунке 1. Видно, что деформация со степенью 1% в температурном интервале 20 — 700°C не оказывает заметного влияния на прочностные и пластические характеристики стали, в то время как деформация со степенью 3% при температуре 300°C приводит к повышению временного сопротивления разрыву и предела текучести от 500 до 530 и от 360 до 420 Н/мм² соответственно. Ударная вязкость при этом снижается с 1,30 до 1,15 Мдж/м². Характер изменения механических свойств толстолистовой стали при степени деформации 3% в интервале 100 — 300°C соответствует общим закономерностям и объясняется интенсивным протеканием процессов старения.

При степени деформации 1% ударная вязкость в исследованном температурном интервале непрерывно возрастает, достигая при 600°C значений 1,82 — 1,85 Мдж/м². Наблюдается повышение ударной вязкости при указанной температуре по сравнению с исходным состоянием и при деформации со степенью 3%.

Микроструктура стали после всех исследованных режимов температурно — деформационной обработки состоит из феррита и перлита. Величина зерна феррита составляет 8 - 9 балл по ГОСТ-5639.

В то же время электронномикроскопические исследования дислокационной структуры феррита стали 09Г2, подвергнутой деформации растяжением на 3% при 600°C, показали, что плотность дислокаций в этом случае значительно ниже по сравнению с деформацией при 20°C и составляет 2,4 — 2,8 x 10⁷ см⁻² против 6,7 — 7,2 x 10⁷ см⁻². При этом, если структура феррита после деформации при температуре 20°C характеризуется неравномерным распределением дислокаций с образованием ячеек, стенки которых состоят из многочисленных дислокационных сплетений высокой плотности, то деформация при 600°C приводит к более отчетливой фрагментации ячеистой структуры к образованию субзерен, что сопровождается снижением плотности дислокаций в результате развития полигонизационных процессов в деформированной матрице.

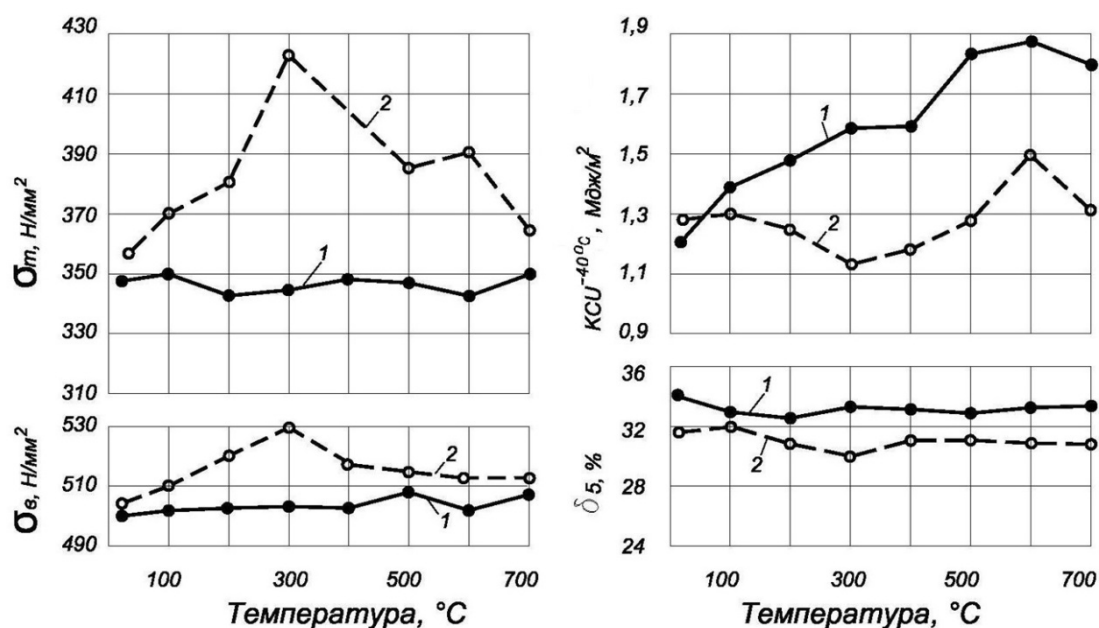


Рисунок 1 - Изменение механических свойств стали 09Г2 в зависимости от температуры и степени деформации:

- 1 — деформация 1%;
2 — деформация 3%.

Следует отметить, что деформация растяжением со степенью 3% приводит к существенному изменению не только структуры феррита, но и перлита. Длинные параллельные пластины цементита разрушаются на отдельные фрагменты и происходит их коагуляция. Образование субзеренной структуры и сфероидизация цементита способствуют улучшению ударной вязкости стали.

Результаты исследования показывают, что режимы правки толстолистового проката могут оказывать существенное влияние на его механические свойства. Регламентируя и контролируя температурно — деформационные условия правки толстых листов можно обеспечить достаточно заметное улучшение механических характеристик низколегированных сталей, обеспечивая увеличение выхода годного при производстве металлопродукции повышенного качества.

Литература:

1. Долженков Ф.Е. Повышение качества толстых листов / Ф.Е. Долженков, Ю.В.Коновалов, В.Г.Носов и др. - М.:Металлургия, 1984 - 247 с.
2. Смагоринский М. Е. Упрочненный толстый лист: учебное пособие / М. Е. Смагоринский. – Л.: ЛГТУ, 1991. – 156 с.

ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ С УСКОРЕННЫМ ПОСЛЕДЕФОРМАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ 10Г2ФБ

Сахаров А.С., Горбатенко В.П.
Донецкий национальный технический университет

Контролируемая прокатка представляет собой многостадийный процесс термомеханической обработки, включающий в себя стадии нагрева, обжата в широком диапазоне температур в областях γ и $\gamma+\alpha$ с последующим охлаждением на воздухе или ускоренно. Цель контролируемой прокатки – формирование мелкозернистой структуры с развитой субструктурой, обеспечивающей получение для низколегированных сталей высокого уровня показателей прочности, пластичности, вязкости и сопротивления хрупкому разрушению [1]. При реализации контролируемой прокатки варьируемыми параметрами считают температуру нагрева, температуру деформации, суммарную и однократную (за 1 пропуск) степень обжата, скорость прокатки, число пропусков и длительность пауз между ними, режимы последеформационного охлаждения [1 - 3]. Технология контролируемой прокатки является в настоящее время основным методом производства толстых листов для изготовления труб магистральных трубопроводов из низколегированных сталей повышенной и высокой прочности, легированных микродобавками сильных карбидо- и нитридообразующих элементов: Nb, V, Ti [1, 3].

Эффективным резервом повышения механических характеристик проката является ускоренное последеформационное охлаждение. В работе [4] показано, что увеличение скорости ускоренного охлаждения листов после контролируемой прокатки в интервале температур от 780-700 до 630-600 °С малоуглеродистых низколегированных сталей, микролегированных ниобием и ванадием, способствует повышению прочностных характеристик и снижению критической температуры хрупкости. Минимальная критическая температура хрупкости была получена при скорости охлаждения около 7 °С/с; при этом наблюдали весьма мелкую смешанную структуру феррита и перлита с небольшой долей бейнита. Деформация в нижней части аустенитной области с последующим ускоренным охлаждением приводит к получению таких же или даже более высоких значений свойств, чем были получены авторами [5] после деформации в двухфазной или ферритной области.

Ускоренное охлаждение непосредственно после деформации способствует более значительному измельчению зерна по сравнению с охлаждением на воздухе, причем наиболее интенсивное измельчение зерна происходит при снижении температуры прокатки с 900 до 800°С. Прокатка при 800°С с последующим ускоренным охлаждением приводит к получению наиболее мелкого ферритного зерна. Последеформационная пауза приводит к увеличению размеров ферритных зёрен [6].

Таким образом, ускоренное последеформационное охлаждение после контролируемой прокатки является перспективным направлением в производстве высококачественной толстолистовой стали и может быть успешно реализовано на современных металлургических предприятиях с использованием новейших технологий и оборудования.

Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния параметров контролируемой прокатки и последеформационного ускоренного охлаждения с использованием методов регрессионного анализа на механические свойства толстолистовой стали 10Г2ФБ.

Объектом исследований являлись листы толщиной 14,9...16,2 мм категории прочности К60 из стали 10Г2ФБ 4 плавов, прокатанные по технологии контролируемой прокатки с последеформационным ускоренным охлаждением. Поскольку интервалы изменения состава стали от плавки к плавке были очень узкими (табл. 1), то оценить влияние компонентов состава на свойства не представлялось возможным

Объектом исследований являлись листы из стали 10Г2ФБ с повышенным содержанием алюминия. Листы прокатывали из слэбов, полученных из стали 4 плавов. Темплеты для изготовления образцов отбирали из 17 листов. Состав стали этих плавов изменялся в достаточно узких пределах, что следует из данных таблицы 2.1. Поэтому обоснованно оценить влияние компонентов химического состава на свойства стали не представляется возможным.

Таблица 1 – Интервалы изменения компонентов состава стали (% масс.)

Элемент	C	Mn	Si	S	P	V	Nb	Ti	Al
Содержание, %	0,10- 0,11	1,60- 1,65	0,28- 0,31	0,003- 0,004	0,009- 0,010	0,030- 0,034	0,036- 0,038	0,017- 0,020	0,034- 0,040

При разработке уравнений регрессии учитывали следующие технологические параметры, как независимые переменные:

- температуру нагрева слэбов, T_n , °C, изменявшуюся в пределах 1210...1215 °C;
- время нагрева слэба в печи, t_n , минут, изменявшуюся в пределах 278...400 мин;
- температуру начала черновой прокатки, $T_{н.черн.}$, °C, изменявшуюся в пределах 1051...1075 °C;
- температуру окончания черновой прокатки, $T_{к.черн.}$, °C, изменявшуюся в пределах 1025...1052 °C;
- температуру начала чистовой прокатки, $T_{н.ч.}$, °C, изменявшуюся в пределах 830...923 °C;
- температуру окончания чистовой прокатки, $T_{к.ч.}$, °C, изменявшуюся в пределах 802...836 °C;
- температуру начала ускоренного охлаждения тела раската, $T_{н.у.о.}$, °C, изменявшуюся в пределах 768...800 °C;
- температуру окончания ускоренного охлаждения тела раската, $T_{о.у.о.}$, °C,

изменявшуюся в пределах 574...675 °С;

- скорость охлаждения в установке, $V_{охл.}$, °С/с, изменявшуюся в пределах 12,7...18,7 °С/с.

В качестве функций отклика (зависимых переменных) выступали показатели механических свойств стали:

- временное сопротивление разрыву, σ_b , Н/мм², изменявшееся в пределах 590...633 Н/мм²;

- условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм², изменявшийся в пределах 510...559 Н/мм²;

- относительное удлинение, δ_5 , %, изменявшееся в пределах 22,5...29,0 %;

- ударная вязкость, $KCU_{-60^\circ C}$, Дж/см², изменявшаяся в пределах 169...286 Дж/см²;

- ударная вязкость, $KCV_{-20^\circ C}$, Дж/см², изменявшаяся в пределах 177...300 Дж/см².

Ниже приведены уравнения регрессии, полученные с применением программы STATISTICA-11.0, и их основные статистические характеристики.

Временное сопротивление разрыву:

$$\begin{aligned} \sigma_b = & 3592 + 0,096 \cdot \tau_{Н} - 2,013 \cdot T_{Н} - 0,0991 \cdot T_{Н.черн.} + 0,0844 \cdot T_{К.черн.} - \\ & - 0,1009 \cdot T_{Н.ч.} - 3,674 \cdot T_{К.ч.} + 3,5835 \cdot T_{Н.у.о.} - 0,4518 \cdot T_{о.у.о.} + 0,8866 \cdot V_{охл.} \\ & \pm 2,1; \text{ Н/мм}^2. \quad R = 0,995 \quad R^2 = 0,991; F = 82,318. \end{aligned} \quad (1)$$

Условный предел текучести:

$$\begin{aligned} \sigma_{0,2} = & 1726 - 0,010 \cdot \tau_{Н} - 1,277 \cdot T_{Н} + 0,8177 \cdot T_{Н.черн.} - 0,3286 \cdot T_{К.черн.} - \\ & - 0,4183 \cdot T_{Н.ч.} - 3,278 \cdot T_{К.ч.} + 4,045 \cdot T_{Н.у.о.} - 0,563 \cdot T_{о.у.о.} + 3,235 \cdot V_{охл.} \\ & \pm 3,9; \text{ Н/мм}^2. \quad R = 0,985 \quad R^2 = 0,970; F = 24,863. \end{aligned} \quad (2)$$

Относительное удлинение:

$$\begin{aligned} \delta_5 = & -1116 - 0,0106 \cdot \tau_{Н} + 0,780 \cdot T_{Н} + 0,0682 \cdot T_{Н.черн.} + 0,195 \cdot T_{К.черн.} + \\ & + 0,2292 \cdot T_{Н.ч.} + 0,4596 \cdot T_{К.ч.} - 0,8471 \cdot T_{Н.у.о.} + 0,044 \cdot T_{о.у.о.} - 0,8497 \cdot V_{охл.} \\ & \pm 1,1; \%. \quad R = 0,929 \quad R^2 = 0,863; F = 4,909. \end{aligned} \quad (3)$$

Ударная вязкость;

$$\begin{aligned} KCU_{-60} = & -7997 + 0,6701 \cdot \tau_{Н} + 5,604 \cdot T_{Н} - 0,4102 \cdot T_{Н.черн.} + 1,507 \cdot T_{К.черн.} + \\ & + 0,4421 \cdot T_{Н.ч.} + 9,677 \cdot T_{К.ч.} - 10,556 \cdot T_{Н.у.о.} + 0,111 \cdot T_{о.у.о.} - 1,735 \cdot V_{охл.} \\ & \pm 37 \text{ Дж/см}^2. \quad R = 0,733; \quad R^2 = 0,538; F = 0,904. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} KCV_{-20} = & -19215 + 1,215 \cdot \tau_{Н} + 14,5 \cdot T_{Н} - 1,082 \cdot T_{Н.черн.} + 2,896 \cdot T_{К.черн.} \\ & + 0,397 \cdot T_{Н.ч.} + 4,857 \cdot T_{К.ч.} - 6,021 \cdot T_{Н.у.о.} + 0,115 \cdot T_{о.у.о.} - 4,208 \cdot V_{охл.} \pm 28 \\ & \text{ Дж/см}^2. \quad R = 0,853; \quad R^2 = 0,727; F = 2,075. \end{aligned} \quad (5)$$

Высокие значения коэффициентов множественной корреляции и критерия Фишера, а также результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных значений показателей свойств (табл. 2) для временного сопротивления разрыву, условного предела текучести и относительного удлинения позволяют считать возможным использование полученных зависимостей для прогнозных оценок уровня этих характеристик. Однако следует учитывать то, что не для всех включенных в уравнения технологических характеристик были получены статистически значимые коэффициенты.

Таблица 2 – Примеры сравнения экспериментальных (Э) и расчетных (Р) показателей механических свойств

Условный номер листа	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$		$\sigma_{0,2}, \text{Н/мм}^2$		$\delta_5, \%$		$KCU_{-60^\circ\text{C}}$ Дж/см ²		$KCV_{-20^\circ\text{C}}$ Дж/см ²	
	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р
1	630	629,4	550	547,5	23,5	23,5	274	288,7	260	276,9
2	620	620,7	540	541,5	29	29,1	261	257,1	248	241,3
3	617	616,9	534	536,1	23,5	23,9	185	216,5	218	237,4
4	616	616,9	537	536,1	24	23,9	228	216,5	241	237,4
5	592	592,2	517	518,9	25	25	212	203,3	210	199,9

Для временного сопротивления разрыву статистически значимым ($p < 0,05$) следует считать положительное влияние увеличения времени нагрева слэбов и температуры начала ускоренного охлаждения и отрицательное влияние повышения температуры нагрева.

Для условного предела текучести статистически значимыми оказались коэффициенты, характеризующие положительное влияние повышения температур начала черновой прокатки и начала ускоренного охлаждения и увеличения скорости охлаждения, а также отрицательного влияния повышения температур начала и окончания чистовой прокатки.

На величину относительного удлинения статистически значимое положительное влияние может оказать повышение температур конца черновой прокатки, начала чистовой прокатки и окончания ускоренного охлаждения, а отрицательное – повышение температуры начала ускоренного охлаждения и увеличение скорости охлаждения.

Статистически значимых факторов влияния на величину $KCU_{-60^\circ\text{C}}$ получено не было. А для $KCV_{-20^\circ\text{C}}$ статистически значимым является лишь положительное влияние увеличения длительности нагрева слэбов в печи. Следовательно, полученные уравнения регрессии для расчета показателей ударной вязкости стали применять не следует. Да и получаемые расчетные значения этих показателей существенно отличаются от экспериментальных данных (табл. 2).

Таким образом, в результате выполнения работы были получены уравнения множественной регрессии, с помощью которых можно выполнять прогнозную оценку ожидаемых показателей свойств стали 10Г2ФБ в зависимости от технологических параметров процесса контролируемой прокатки с последеформационным ускоренным охлаждением толстых листов. При этом высокую сходимости экспериментальных и расчетных результатов получили при определении показателей прочности и пластичности. Для показателей ударной вязкости полученные зависимости не обеспечивают должной надежности расчетов.

Литература:

1. Матросов Ю.И. Сталь для магистральных трубопроводов/Ю.И. Матросов, Д.А. Литвиненко, С.А. Голованенко.–М.:Металлургия, 1989.–288 с.
2. Горбатенко В.П. Влияние содержания микролегирующих элементов на механические свойства толстолистовой стали 10Г2ФБ после контролируемой прокатки / В.П. Горбатенко, В.В. Бурховецкий, В.Г. Конарев, В.В. Климанчук, Э.Н. Шебаниц, А.В. Мурашкин //Науков іпраці Донецького національного технічного університету. – (Сер. «Металургія»). – Вип. 9 (122)). – Донецьк, 2007. – С. 188-197.
3. Погоржельский В.И. Контролируемая прокатка / В.И. Погоржельский, Д.А. Литвиненко, Ю.И. Матросов, А.В. Иваницкий – М.: Металлургия, 1979. – 184 с.
4. Белый А.В., Сокол Г.А., Ковалев В.А., Вьюнов Г.Н. Ускоренное охлаждение листа с прокатного нагрева / А.В. Белый, Г.А. Сокол, В.А. Ковалев, Г.Н. Вьюнов // Интенсификация производства листовой стали. Тематический сборник научных трудов. – Москва: Металлургия, 1988. -128 с.
5. Эфрон Л.И. Формирование структуры и механических свойств конструкционных сталей при термомеханической обработке в потоке прокатного стана / Л.И. Эфрон // Сталь. – 1995. -№8. –С.57-64.
6. Баранов А.А. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали / А.А. Баранов, А.А. Минаев, А.Л. Геллер, В.П. Горбатенко. –Москва: Металлургия, 1985.-128 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Сахаров А. С., Крымов В. Н.

ФГБОУ ВО Донецкий национальный технический университет

Жаропрочные никелевые сплавы – это сплавы на основе никеля с присадками хрома и ряда других легирующих элементов (С, V, Мо, Nb, W, Ti, Al, В, Се и др.), главной особенностью и преимуществом которых является сохранение при высоких температурах повышенной прочности. Они нашли широкое применение в металлургическом, термическом оборудовании, химическом машиностроении, атомной и ракетной технике, а также энергетическом машиностроении. Уникальный комплекс свойств этих сплавов обеспечивается сочетанием сложного химического состава, многофазной структуры и специально подобранных режимов термической обработки.

В настоящее время сплавы на никелевой основе имеют наибольшее значение в качестве жаропрочных материалов, предназначенных для работы при температурах от 700 до 1100°С. Они применяются при изготовлении деталей ракетно-космической техники, в газовых турбинах двигателей самолетов, кораблей, энергетических установок, в нефтехимическом оборудовании [1].

Но, несмотря на уже хорошую изученность данных сплавов, на производстве возникает брак продукции, из-за несоблюдения технологии выплавки, термической и термомеханической обработки или других технологических операций. Термическая обработка этих сплавов очень сложна, из-за отсутствия диаграмм состояния. Термическая обработка никелевых жаропрочных сплавов требует не только соблюдения режимов, но и глубокого знания их химического состава, фазовой устойчивости и структурных характеристик. [2].

Производственный опыт показывает, что нарушение режимов выплавки, гомогенизации, закалки или старения приводит к формированию нежелательных структурных составляющих: избыточных карбидов, дендритной ликвации, неравномерного распределения γ' -фазы. Это снижает жаропрочность, вызывает охрупчивание и приводит к браку изделий. Поэтому исследование влияния параметров термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов является актуальной задачей.

В работе исследованы образцы сплава ВЖ159-ВД. Химический состав соответствовал требованиям ГОСТ 5632-2014 и приведен в таблице 1.

Сплав ВЖ159-ВД содержит Cr, Al, Мо, Nb, Fe и другие элементы, обеспечивающие формирование γ' -фазы и карбидов. Исходная структура характеризуется дендритностью, наличием карбидов и γ' -фазы (рис. 1)

Таблица 1 – Химический состав сплава ВЖ159-ВД, масс. %

Cr	Al	Co	Mo	Nb	Ti	Fe	C	Si	Mn
27	1,35	-	7,4	3,05	-	≤ 3	0,06	0,4	0,3

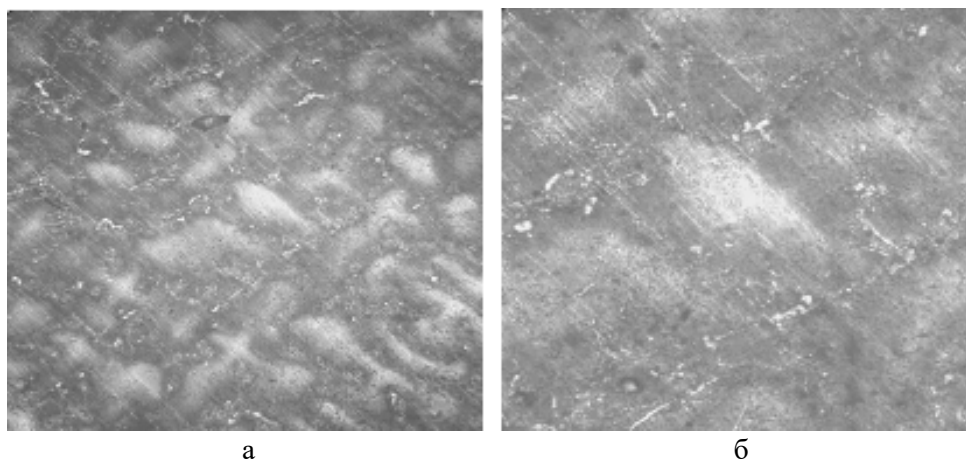


Рисунок 1 - Микроструктура исходного образца из сплава ВЖ159 - ВД x200 (а) и x500 (б)

В исследовании применялись следующие режимы термической обработки (таблицах 2, 3).

Таблица 2 - Режим закалки образцов из сплава ВЖ 159 ВД

Номер режима	$T_n, ^\circ\text{C}$	$\tau_n, \text{мин}$	$\tau_b, \text{мин}$	Охл. среда	$V_{\text{охл}}, ^\circ\text{C/с}$
1	1100	15	15	Металл. плита	3,6
2	1180				3,8

Таблица 3 - Режимы старения исходных образцов и обработанных по режимам 1 и 2

Режимы старения	$T_n, ^\circ\text{C}$	$\tau_b, \text{мин}$	Охл. среда	$V_{\text{охл}}, ^\circ\text{C/с}$
А	800	60	Металл. плита	3,25
Б		180		3,25
В		300		3,25
Г		420	Воздух	1,08
Д	700	60	Металл. плита	3,4
Е		180		3,2
Ж		300		3,1
З		420	Воздух	1,13

Таблица 4 - Значения твердости образцов из сплава ВЖ 159 ВД, HRC

Состояние образца	Твердость, HRC
Исходные образцы	38,5
После закалки 1100 $^\circ\text{C}$	30,5
После закалки 1180 $^\circ\text{C}$	30,5

Как видно из данных таблицы 4 проведение закалки позволило снизить значение твердости до 30,5 HRC, а также уменьшить разброс значений твердости на образцах, что может свидетельствовать о растворении составляющих сплава в γ -твердом растворе, и о получении более равномерной структуры, что видно при сравнении структуры закаленных образцов (рис. 2) с исходной структурой (рис. 1).

Таким образом, проведение закалки, очевидно, привело к частичной гомогенизации структуры, растворению γ' - фазы и карбидных фаз типа Me_6C , $Me_{23}C_6$. На рисунках 3 показано влияние длительности старения на твердость закаленных и исходных образцов.

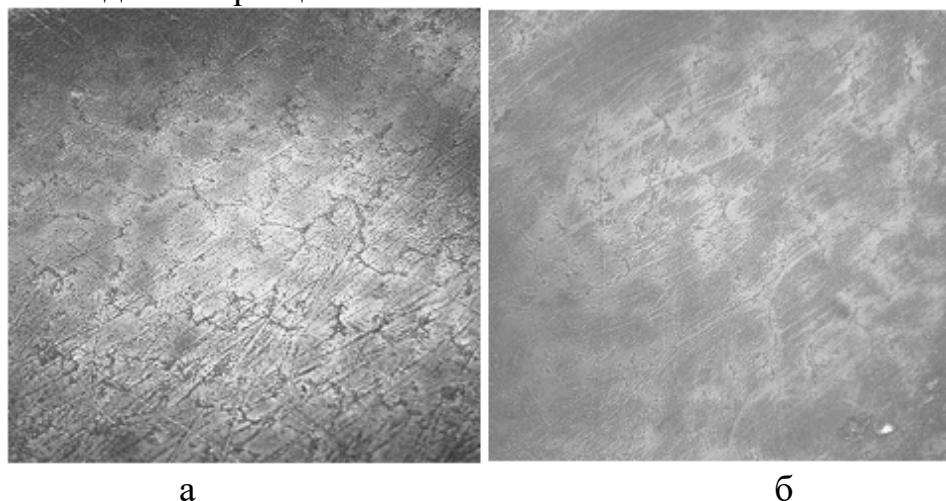


Рисунок 2 - Микроструктура образца после закалки 1100 °С x200 (а) и 1180 °С x200 (б)

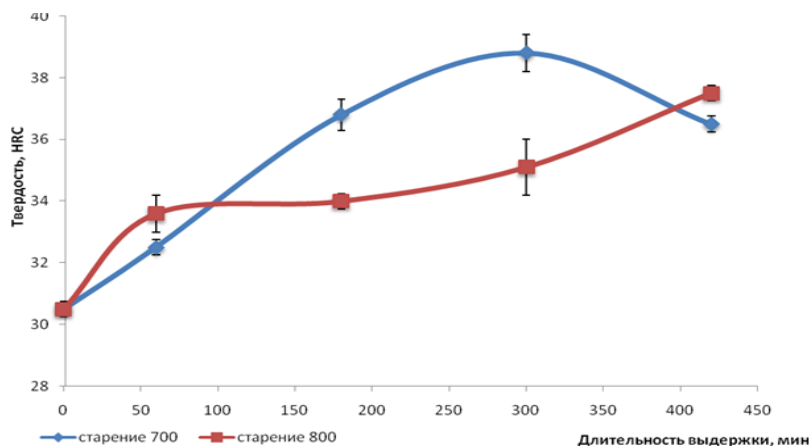


Рисунок 3 - Влияние длительности старения образца, закаленного от температуры 1100 °С, на значение твердости

Как видно из рис. 3 увеличение длительности старения при 800 °С приводит к увеличению твердости на всем этапе старения. Максимальная твердость получена при старении 700 °С длительностью 5 часов, дальнейшее увеличение длительности выдержки снижает уровень твердости. В структуре образца (после старения при 700 °С длительностью 300 минут) наблюдается значительное количество выделений γ' - фазы, а также карбидов по границам и внутри зерен. При увеличении длительности старения до 420 минут в структуре

образца наблюдается незначительное подрастание и коагуляция выделений.

Характер изменения твердости от длительности старения различный при разных температурах. При старении 700 °С закаленных с 1180 °С образцов выделяется схожая зависимость, как при старении образцов закаленных с 1100 °С (в начале рост уровня твердости, максимальное значение при длительности старения - 5 часов, а затем снижение уровня твердости).

Выводы.

1. Закалка при 1100 и 1180 °С приводит к выравниванию структуры за счёт частичной гомогенизации и растворения γ' -фазы и карбидов.

2. Старение после закалки формирует максимальную твёрдость благодаря большому количеству мелких кубических частиц γ' -фазы и дисперсных карбидов, равномерно распределённых по зерну.

3. Старение после закалки формирует максимальную твёрдость благодаря большому количеству мелких кубических частиц γ' -фазы и дисперсных карбидов, равномерно распределённых по зерну.

4. Режим №2 рекомендуется для работы выше 800 °С; режимы №1 и №3 — для длительной работы ниже 700 °С.

5. Низкая твёрдость в начале старения связана с медленным выделением γ' -фазы; снижение при больших временах — с её укрупнением и коагуляцией.

Литература:

1. Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Химушин Ф.Ф.. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.

2. Симс, Ч.Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч.Т. Симс, Н.С. Столофф, У.К. Хагель. - [в 2-х книгах. Кн. 1] ; пер. с англ. – Р.Е. Шалин. - М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЦИНКОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ БОРИРОВАННОЙ СТАЛИ

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

В современном материаловедении вопросы повышения эксплуатационных свойств конструкционных материалов остаются одними из наиболее актуальных. Особую значимость приобретают методы поверхностной обработки, позволяющие целенаправленно модифицировать свойства поверхностного слоя изделий без изменения характеристик основного материала. Это особенно важно для стальных деталей, работающих в условиях интенсивного износа, коррозионного воздействия и высоких механических нагрузок. Одним из перспективных направлений является комбинированная поверхностная обработка, сочетающая несколько этапов для получения более высоких свойств.

В современных исследованиях, касающихся повышения эксплуатационных свойств изделий путем химико-термической обработки, много внимания уделяют обработке в среде нескольких насыщающих компонентов, корректировке режимов обработки и состава насыщающей смеси для получения слоев определенной толщины. Недостаточно изучен вопрос последовательной химико-термической обработки различными насыщающими компонентами с целью повышения свойств в сложных условиях эксплуатации. В данной статье рассматривается последовательное применение двух методов химико-термической обработки стали: борирования и цинкования.

Для исследования влияния дополнительного цинкования на структуру стали, подвергнутой термодиффузионному борированию, были подготовлены образцы из низкоуглеродистой стали ($\approx 0,2\% \text{C}$) в виде пластинок 20×15 мм толщиной 2 мм. На рисунке 1 представлены схемы борирования и цинкования, реализованные в ходе обработки образцов.

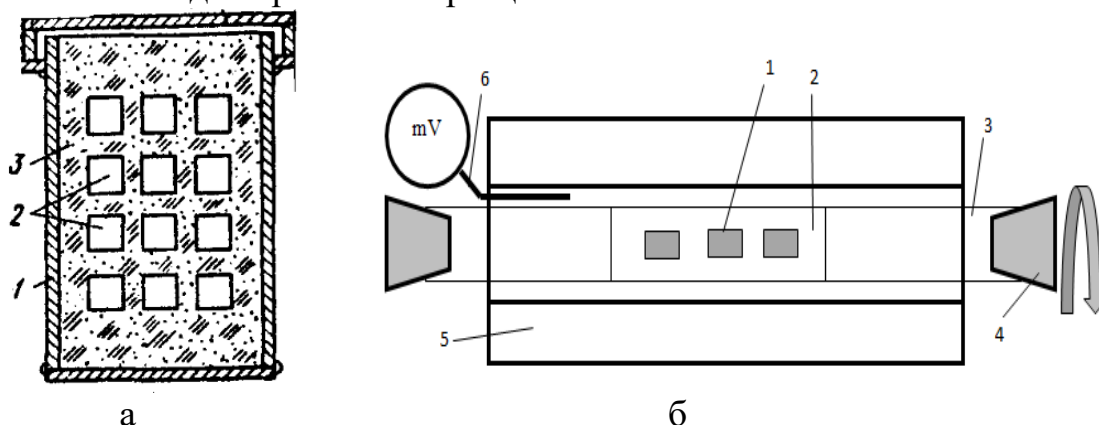


Рисунок 1 – Схема процессов обработки образцов:

- а – борирование (1 – контейнер, 2 – образцы, 3 – насыщающая смесь),
б – цинкование (1 – образец, 2 – насыщающая смесь, 3 – кварцевая трубка,
4 – пробка, 5 – термическая печь, 6 – термопара)

Борирование выполняли в контейнере в смеси карбида бора и фтористого натрия в соотношении 98:2. Контейнер закрывали плавким затвором для герметизации реакционного пространства и защиты образцов от окисления. Цинкование проводили во вращающейся кварцевой трубке в смеси порошка цинка и кварцевого песка в соотношении 35:65. Вращение трубки в процессе термообработки имитирует обработку в ретортной печи, обеспечивая перемешивание насыщающей смеси и получение более равномерного цинкового слоя на образцах.

Борирование проводили при температуре 930-950°C в течении 4 часов. Цинкование проводили при различных температурах в интервале 450-550°C в течении 1 часа. На рисунке 2 представлена микроструктура стали после борирования с дополнительным цинкованием.

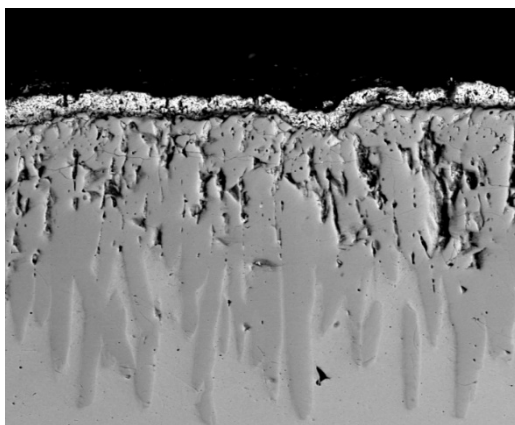


Рисунок 2 – Микроструктура стали после борирования и цинкования, х400

Как видно, на микроструктуре хорошо визуализируются как иглы боридов, так и сплошной цинковый слой. Металлографическое измерение толщины цинкового слоя осложнено из-за того, что при механической шлифовке и полировке происходит частично скалывание, а частично «заваливание» края слоя.

Для оценки толщины слоя цинковой фазы использовали толщиномеры покрытий «Кропус ТМ-4» и «Константа К-5», результаты измерений представлены на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, толщина боридного слоя до цинкования была практически одинаковой на всех образцах, около 14 мкм. Как известно, иглы боридов проникают в материал подложки на гораздо большую глубину [1]. В работе [2] было выдвинуто предположение, что приборами в качестве слоя боридов определяется только сплошной поверхностный слой FeB. Что касается цинкования, наблюдается тенденция увеличения толщины слоя с увеличением температуры насыщения.

Снижение толщины слоя после комплексной обработки (рис. 3, кривая 3), связано с изменением электрических и магнитных свойств покрытия. Цинк является диамагнетиком. Поэтому изменение индукции магнитного поля, созданного рабочей катушкой датчика толщиномера, будет мизерным. Однако известно, что при легировании диамагнитные свойства цинка могут изменяться

на парамагнитные и даже слабо ферромагнитные.

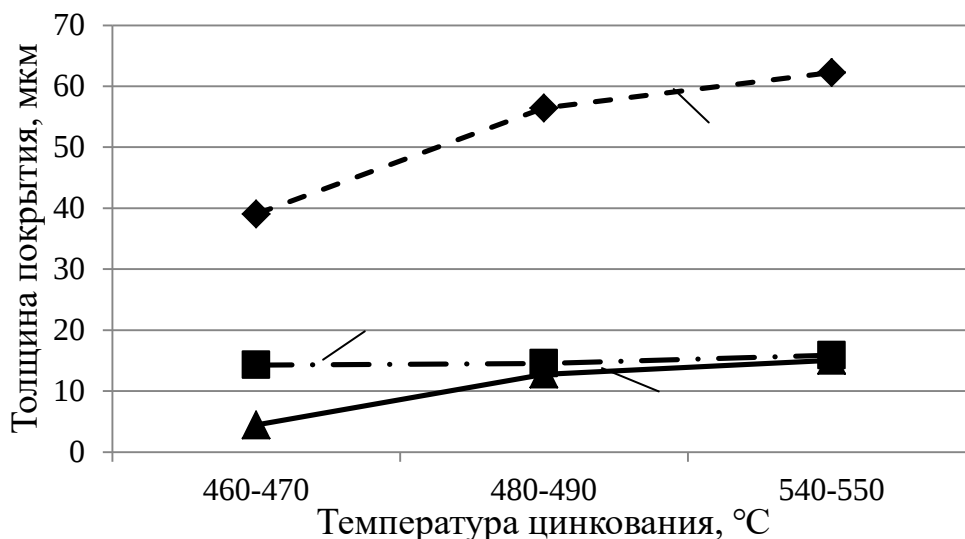


Рисунок 3 – Результаты измерения толщины поверхностных слоев толщиномерами Кропус (1) и Константа (2, 3):
1, 3 – борирование + цинкование; 2 – борирование;

Очевидно, что в большей степени на обсуждаемый эффект влияет повышение проводимости покрытия после нанесения слоя цинка. Электрическое сопротивление боридов FeB и Fe₂B составляет, соответственно $100 \cdot 10^{-8}$ и $40 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [3], в то время как сопротивление цинка $5,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Вероятно, следствием образования слоя с большей проводимостью является увеличение индукционного тока на поверхности образца и, соответственно, повышение напряженности поля, которое регистрирует измерительная катушка датчика. В результате регистрируемая толщина слоя снижается.

Таким образом, при комплексной ХТО стали, заключающейся в борировании и последующем цинковании, образуются два четко различимых слоя. Определение толщины слоя цинка затруднено как металлографическим способом, так и с помощью магнитной толщинометрии из-за суммарного влияния различных факторов.

Литература:

1. Türkmen, İ., Yalamaç, E. Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 744. – С. 658-666.
2. Савула, Е. А. Анализ методов оценки толщины диффузионных боридных покрытий / Е. А. Савула, В. Н. Крымов, В. П. Горбатенко // Металлургия XXI столетия глазами молодых : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 28 мая 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 128-131.
3. Самсонов, Г. В. Бориды / Г. В. Самсонов, Т. И. Серебрякова, В. А. Неронов. - Москва : Атомиздат, 1975. - 376 с.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛИТ В СРАВНЕНИИ СО СТАЛЬЮ 75ХФТЛ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УЗЛОВ АГЛОФАБРИК

Турусов Е.М., Рябикина М.А.

Приазовский государственный технический университет» – филиал
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет»

Биметаллические плиты являются эффективным решением для защиты оборудования от экстремального абразивного износа, температур, эрозии и умеренных ударов абразива, что является критически важным для течек (желобов) аглофабрик, транспортирующих горячий агломерат [1-3].

Биметаллическая плита состоит из двух слоев, соединенных наплавкой, рис. 1. Основа – мягкая конструкционная сталь, обеспечивающая структурную прочность, пластичность, вязкость, свариваемость. Внешний слой – высокохромистый чугун, следующего химического состава: 3,5-5,5 % С; 20-30 % Cr; 0,5-2,0 % Mn; 0,5-1,5 % Si; Fe – остальное, рис. 2.

В отличие от стали 75ХФТЛ, содержание хрома в биметаллической плите в 20-30 раз выше, благодаря чему в структуре поверхностного слоя плиты образуются сверхтвердые первичные карбиды Cr_7C_3 в виде гексагональных призм, рис. 2-3.

Сравнительный анализ микроструктур стали 75ХФТЛ после изотермической закалки и биметаллической плиты представлен в таблице 1.



Рисунок 1 – Износостойкая пластина

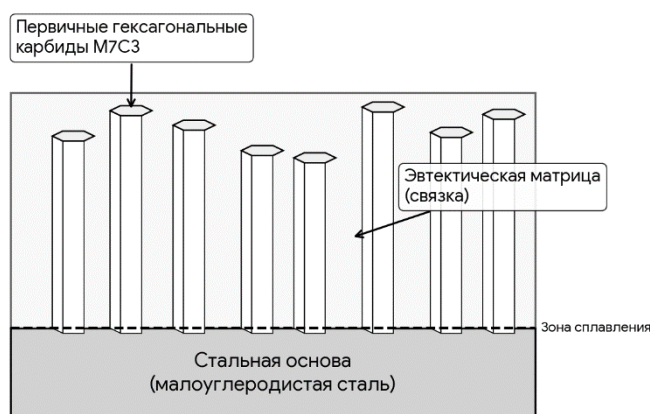


Рисунок 2 – Схема строения биметалла: кристаллизация первичных карбидов хрома в виде гексагональных призм, которые растут в сторону теплоотвода – от стальной основы к поверхности наплавленного слоя. Чем меньше расстояние между кристаллами, тем выше износостойкость биметалла

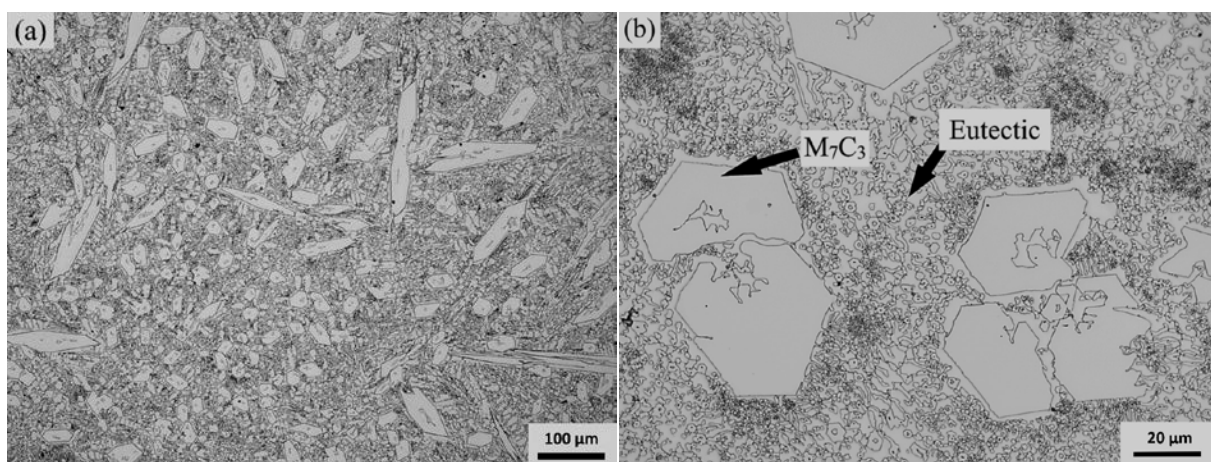


Рисунок 3 – Структура поперечного сечения наплавленного слоя из эвтектики и карбидов хрома; на рис. 3, б хорошо видны шестигранные сечения первичных карбидов M_7C_3 . Химический состав наплавленной проволоки: 4,0 % C; 30,0 % Cr; 2,0 % Mn и Si; остальное – Fe [4]

Уравнение Арчарда [5] определяет прямую зависимость между износом материала и приложенной нагрузкой:

$$V = K \frac{F_n \cdot L}{H}, \quad (1)$$

где V – объем изношенного материала, K – коэффициент износа, F_n – нормальная нагрузка (сила давления агломерата на плиту), L – путь трения (расстояние, которое проходит агломерат по плите), H – твердость поверхности плиты.

Принимая, при прочих равных условиях среднюю твердость стали 75ХФТЛ, равной 600 HV, а биметаллической плиты – 1200-1600 HV (именно

карбиды принимают на себя износ агломератом), из уравнения (1) следует, что потеря массы биметаллической плиты в сравнении со сталью 75ХФТЛ будет в 2-3 раза ниже.

В начале работы твердость стали 75ХФТЛ невысокая, но под влиянием нагрузки (F_n) активируется ДДМП, твердость поверхностного слоя H возрастает и, согласно уравнению Арчарда, объем изношенного материала V снижается. Таким образом, износостойкость не всегда прямо пропорциональна твердости.

Таблица 1 – Сравнительное описание микроструктур

Характеристика	Сталь 75ХФТЛ после изотермической закалки: нагрев 860 °С, (30 мин)→вода (кратковременно)→печь 350 °С (30 мин) →воздух	Биметаллическая плита, наплавка (сварка) порошковой проволокой
Структура	Гетерогенная: бейнит+15-18 % остаточного аустенита + карбиды $M_{23}C_6$	Гетерогенная: ледебуритная эвтектика+первичные карбиды хрома M_7C_3
Вклад фаз	Матрица противостоит ударам, остаточный аустенит превращается в мартенсит (ДДМП); мартенсит и карбиды защищают от износа	Матрица обеспечивает монолитность структуры, перераспределяет нагрузку, карбиды противостоят удару и трению агломерата
Микротвердость фаз	В среднем 450-600 HV	Матрица – 400-600 HV, карбиды –1200-1600 HV

Механизм изнашивания у сравниваемых материалов различный. Сталь 75ХФТЛ обладает адаптивным механизмом изнашивания, при котором энергия удара (царапания) абразива расходуется на протекание ДДМП ($A_{ост.} \rightarrow M_{деф.}$), в этом случае сохраняется вязкая сердцевина, а поверхность стали может «самозалечиваться». Напротив, механизм изнашивания биметаллической плиты – пассивный: частицы агломерата движутся по сверхтвердому каркасу из первичных карбидов хрома. График на рис. 4 иллюстрирует теоретическую модель износостойкости сравниваемых материалов.

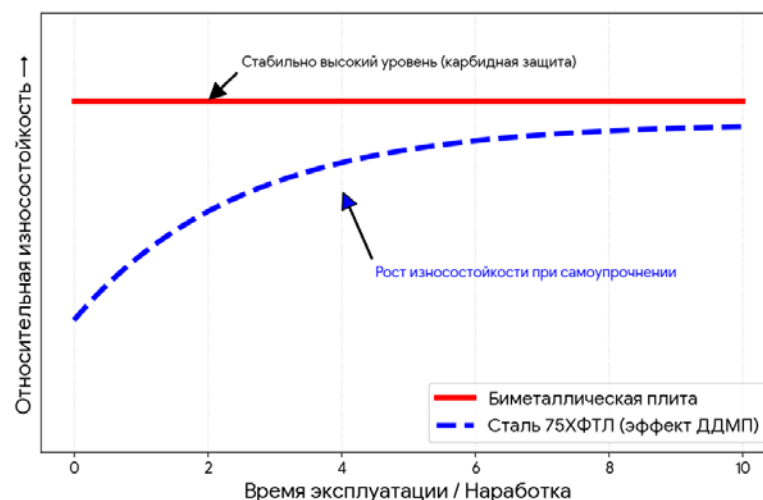


Рисунок 5 – Ожидаемое поведение сравниваемых материалов

Заключение. Обзор литературных данных показал, что биметаллические плиты обладают высокой и стабильной износостойкостью за счет каркаса из сверхтвердых карбидов хрома M_7C_3 в виде шестигранных призм. Сталь 75ХФТЛ под действием ударов абразива о ее поверхность самоупрочняется и приближается по износостойкости к биметаллу. Данное предположение о поведении материалов сделано в конкретных условиях работы аглофабрики.

Литература:

1. Малинов Л.С. Повышение свойств низколегированных литейных сталей 35ХМЛ и 70ХЛ // Литейное производство», 2022. – С. 2-8.
2. Повышение эксплуатационной надежности футеровочных плит трактов сыпучих материалов аглофабрик с использованием стали 75ХФТЛ и современных износостойких материалов // ПГТУ – филиал НИУ МГСУ: официальный сайт. Мариуполь, 2026. URL: <https://pstu.su/nauka/konferencii/konferenciya/vserossijskaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciyanauchnyj-potencial-priazovya-g-mariupol-25-26-marta-2026-goda/> (дата обращения: 10.05.2026).
3. Метастабильный аустенит как смарт-ресурс износостойкости стали 75ХФТЛ// ПГТУ – филиал НИУ МГСУ : официальный сайт. Мариуполь, 2026. URL: <https://pstu.su/nauka/konferencii/konferenciya/vserossijskaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciyanauchnyj-potencial-priazovya-g-mariupol-25-26-marta-2026-goda/> (дата обращения: 10.05.2026).
4. Li, J. Role of Microstructure in Wear Resistance of Chromium Carbide Overlay / J. Li. – Edmonton : University of Alberta, 2006. – 160 p. – URL: <https://ualberta.scholaris.ca/bitstreams/7be13652-93ca-4c37-9132-0a43c8852f52/download> (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.
5. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) : Учебник / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : «Издательство МСХА», 2001. – 616 с.

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕЙНИТНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ

Юнусов А.М., Осколкова Т.Н.

Сибирский Государственный Индустриальный Университет

С целью повышения эксплуатационных свойств железнодорожных рельсов, которые традиционно производят из сталей перлитного класса, одним из направлений является применение рельсов из бейнитных сталей, которые кроме повышенных механических характеристик обладают повышенной стойкостью к образованию контактно-усталостных дефектов и сопротивлению к развитию усталостных трещин [1].

В России активно заниматься разработками технологии производства рельсов из бейнитной стали, начали на рубеже 2000-х годов [2,3]. Разработка технологии производства бейнитных рельсов на Западно-Сибирском металлургическом комбинате обеспечила высокий комплекс физико-механических свойств, однако, полигонные испытания показали повышенное количество изъятий, связанных с загрязнённостью неметаллическими включениями. Несмотря на это, рельсы из данной стали показали свою перспективность [4].

Проведенная на комбинате реконструкция сталеплавильного и прокатного производства позволила вновь вернуться к разработке технологии производства рельсов из бейнитной стали со свойствами, отвечающими всем современным условиям эксплуатации. В 2022 году произведена выплавка и прокатка рельсов типа Р65 двух опытных плавок, химический состав которых обеспечивает получение однородной бейнитной структуры при непрерывном охлаждении в условиях естественной конвекции [5]. Результаты механических испытаний металла опытных рельсов обоих составов показали высокий комплекс механических свойств, превышающий значения для перлитных рельсов общего назначения категории ДТ350, особенно по уровню ударной вязкости [6]. Несмотря на это, в шейке рельсов получена неоднородность микроструктуры, обусловленная развитием ликвационных процессов и увеличенными скоростями охлаждения более тонкого сечения профиля рельсов.

Целью исследования настоящей работы является разработка рационального химического состава стали бейнитного класса с обеспечением однородной структуры по элементам профиля, а также применением ускоренного охлаждения головки рельса, как наиболее массивного элемента профиля. Выбор состава должен обеспечивать получение однородной структуры бейнита при скоростях охлаждения 2 – 3 °C/с на начальном этапе, обеспечивающих выравнивание температуры по сечению, с применением установки дифференцированной закалки рельсов вентиляторным воздухом до температуры начала бейнитного превращения. Далее, охлаждение в интервале бейнитного превращения предполагается проводить замедленно в диапазоне скоростей 0,5 – 0,05 °C/с, соответствующем охлаждению в условиях свободной

конвекции воздуха.

Литературный обзор зарубежного и отечественного опыта производства рельсов [2, 7 – 9] показал, что получение бейнитной структуры при охлаждении на спокойном воздухе достигается в широком интервале химических составов (таблица 1).

Таблица 1 – Химические составы бейнитных рельсов

Страна, фирма	Марка стали	Содержание химических элементов, %						
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
Россия, ЗСМК	30ХГ2САФМ, (2005)	0,32	1,48	1,21	1,00	0,07	0,2-0,3	0,13
	30ХГ2С2АФМ (2022)	0,32	1,5	1,40	1,1	0,11	0,25	0,14
	30ХГ2САФН (2022)	0,32	1,5	1,0	1,5	1,0	0,2-0,3	0,14
Россия, НТМК	35Х1Г2СН (2008)	0,31	1,49	0,81	1,34	1,02	-	0,13
	35Х1Г2СН (2022)	0,33	1,51	0,85	1,35	1,01	-	0,11
США	J6	0,25	2,0	1,80	1,95	-	0,45	-
Швейцария	B360	0,3	1,55	1,25	0,5	-	0,10–0,22	-
Германия	-	0,40	1,50	0,70	1,10	-	0,80	0,10
Австрия	340 Dobain HSH	0,76-0,84	0,80-0,90	0,20-0,35	0,40-0,55	-	-	-
	MP380	0,47	1,19	0,41	0,50	-	0,10	0,14
Англия	-	0,50	2,00	1,50	-	-	-	-
		0,23	1,30	0,40	0,30	-	0,04	0,04
Япония	-	0,28-0,34	0,70-1,32	0,30-0,55	1,32-2,51	-	0...0,26	0...0,1
Китай	U22SiMn	0,20-0,26	2,0-2,1	1,30-1,45	-	-	-	-

Анализируя указанные в таблице 1 составы, можно выделить основные градации по углероду: низкоуглеродистые 0,20-0,3 %; среднеуглеродистые 0,4-0,5 % и высокоуглеродистые 0,76-0,84 %. По содержанию марганца: среднемарганцовистые 0,7-1,3 % и высокомарганцовистые 1,5-2,0 %. Содержание хрома варьируется в широких пределах от 0,3 до 2,5 %. Также в ряде случаев сталь легируется молибденом, преимущественно в концентрации 0,2-0,4%.

Из рассмотренного ряда легирующих элементов наиболее сильное влияние на формирование бейнитной структуры оказывает углерод, марганец, хром, молибден и никель. При выборе системы легирования стали исходили из необходимости получения стабильной бейнитной структуры с учетом экономической эффективности производства стали. Никель, несмотря на его высокую способность стабилизации переохлажденного аустенита, добавляют в меньшей степени из экономических соображений. По этой же причине ограничили содержание хрома и молибдена соответственно в пределах 0,70 - 1,80 % и 0,17 - 0,60 %. Для эффективности бейнитного превращения

содержание марганца и кремния установили соответственно в пределах 0,4 - 1,3 и 0,25 – 0,35 %.

В соответствии с поставленными задачами исследования и учетом теоретических предпосылок по разработке стали бейнитного класса в качестве объектов исследования были выбраны низко- и среднеуглеродистые стали с содержанием углерода 0,25-0,29; 0,30-0,34 и 0,38-0,42 %, легированные марганцем, кремнием, хромом и молибденом. В качестве микролегирующих добавок использовали ванадий, вводимый совместно с азотом (таблица 2).

Таблица 2 - Химический состав опытных составов

№ состава	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V	N
1	0,25- 0,29	1,1- 1,3	0,25- 0,35	0,70- 0,80	0,17- 0,23	0,75- 0,85	0,10- 0,20	0,010- 0,015
2	0,30- 0,34	0,38- 0,42	0,25- 0,33	1,4- 1,8	0,57- 0,60	0,06- 0,010	≤0,001	≤0,008
3	0,38- 0,42	0,62- 0,67	0,22- 0,30	0,76- 0,84	0,32- 0,37	0,8-0,9	≤0,001	≤0,008

Введение в сталь марганца, кремния, хрома и никеля обусловлено необходимостью максимально возможного смещения области перлитного превращения на термокинетической диаграмме вправо, а также расширения и сдвига влево области бейнитного превращения для реализации более широкого диапазона скоростей охлаждения. Выбор данных составов обусловлен возможностью получения бейнитной структуры при скоростях охлаждения от 0,5 °C /с и выше. При непрерывном охлаждении с достаточно низкими скоростями 0,15 – 0,2 °C /с в головке рельса превращение будет протекать частично по диффузионному механизму.

Таблица 3 – Диапазоны превращений для стали состава № 1

Скорость охлаждения, °C/с	Температурный интервал превращения, °C				
	Аустенит →Перлит	Аустенит → Бейнит		Δ	M _H
0,1	743- 560	520	295	225	-
0,3	718- 605	560	297	263	-
0,5	714- 597	564	317	247	-
1	-	563	320	243	320
2	-	564	332	232	332
3	-	563	342	221	342
5	-	510	347	163	347

Выплавку слитков массой около 5 кг проводили в лабораторной индукционной печи с разливкой в слитки прямоугольного сечения в разборные формы. После выплавки проводили рентгеноспектральный анализ химического состава и прокатку слитков на лабораторном стане на заготовки диаметром 10 мм. Для дилатометрических исследований вырезали стандартные образцы диаметром 4 мм и длиной 10 мм. Структурные превращения стали исследовали на дилатометре Linseis RITA L78. Температурные интервалы превращений в зависимости от скорости непрерывного охлаждения для каждого из трех составов представлены в таблицах 3, 4 и 5. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX71.

Таблица 4 - Диапазоны превращений для стали состава № 2

Скорость охлаждения, °C/с	Температурный интервал превращения, °C				
	Аустенит → Феррит	Аустенит → ФКС+ бейнит		Δ	M _н
0,1	777-616	538	316	222	-
0,3	740-590	557	313	244	-
0,5	731-592	563	313	250	-
1	-	570	338	232	-
2	-	545	325	220	325-153
3	-	525	334	191	224-140
5	-	495	289	206	289-146

Таблица 5 - Диапазоны превращений для стали состава № 3

Скорость охлаждения, °C/с	Температурный интервал превращения, °C				
	Аустенит → Феррит	Аустенит → ФКС+ бейнит		Δ	M _н
0,3	-	582	323	259	-
0,5	-	582	326	256	-
1	-	553	315	238	315-193
2	-	553	325	228	325-161
5	-	-			361-164

При скоростях охлаждения 0,1 – 0,5 °C/с на образцах стали № 1, превращение происходит в основном по диффузионному механизму, при этом наблюдаются небольшие участки верхнего бейнита (рис. 1а). При скорости охлаждения 1 °C/с и выше, перлитное превращение подавляется, имеется достаточно широкая область бейнитного превращения около 250 °C, но при этом в микроструктуре кроме верхнего и нижнего бейнита наблюдаются небольшие участки выделений мартенсита (табл. 3, рис. 1б). При повышении скорости охлаждения в структуре количество и размеры участков мартенсита и количество бейнита увеличивается (рис. 1в).

На образцах стали состава № 2 при скоростях охлаждения 0,1 – 0,5 °C/с

превращение также происходит по диффузионному механизму со значительным выделением ферритной фазы (рис. 2а). При скоростях охлаждения $0,3 - 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ структура образцов близка между собой, начинают появляться небольшие участки верхнего бейнита (рис. 2б). При скорости $1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ превращение происходит по промежуточному типу в бейнитной области, имеющей также широкий интервал (рис. 2в). При скорости охлаждения $2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и выше в структуре наблюдаются выделения мартенситной фазы, и с увеличением скорости охлаждения количество мартенсита увеличивается (рис. 2г).

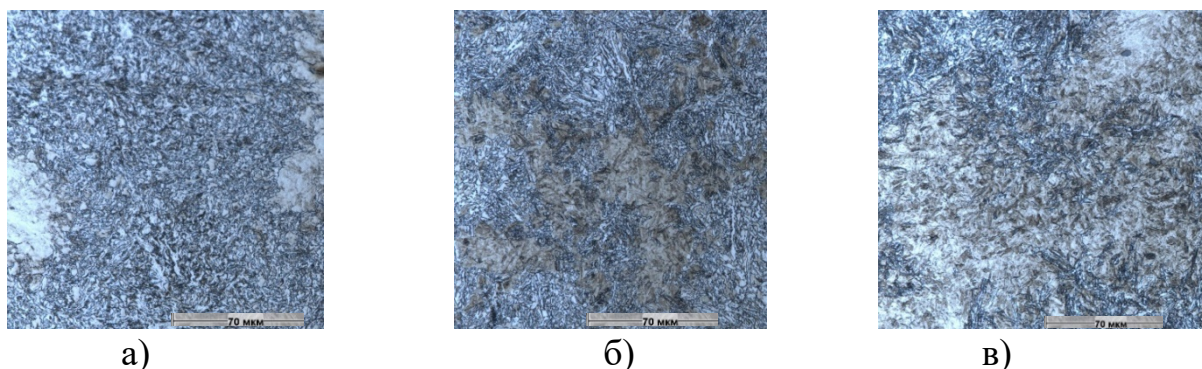


Рисунок 1 - Микроструктура состава №1, при скоростях охлаждения:
(а) $V = 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, б) $V = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, в) $V = 3,0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$

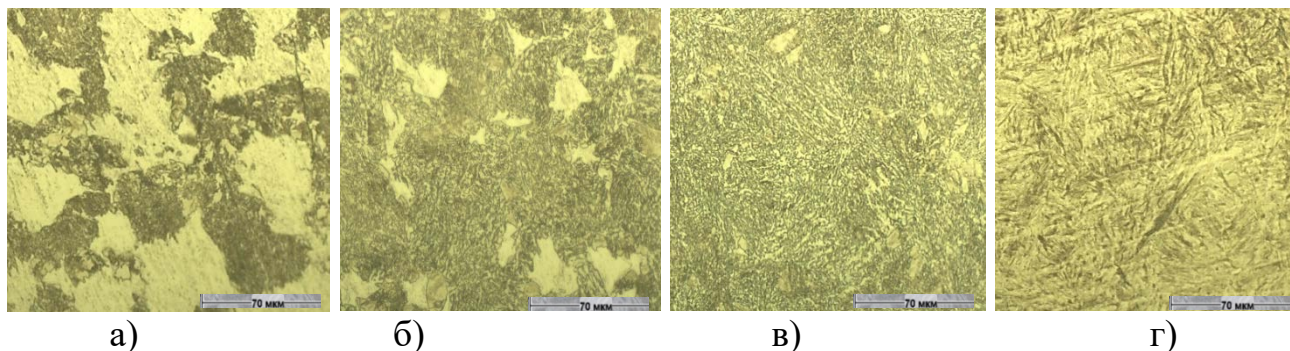


Рисунок 2 - Микроструктура состава № 2, при скоростях охлаждения:
(а) $V = 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, (б) $V = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, в) $V = 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, г) $V = 3,0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$

Для состава № 3 диффузионный механизм превращения реализуется при скорости охлаждения $0,3 - 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ с небольшой долей феррита и бейнита (рис. 3а, 3б). При скорости охлаждения $1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и выше структура образцов представляет собой смесь верхнего и нижнего бейнита с выделением некоторого количества мартенсита (рис. 3в). При непрерывной скорости охлаждения $2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и выше структура состоит из нижнего бейнита и мартенсита (рис. 3г). При этом с дальнейшим повышением скорости охлаждения количество мартенситной фазы увеличивается.

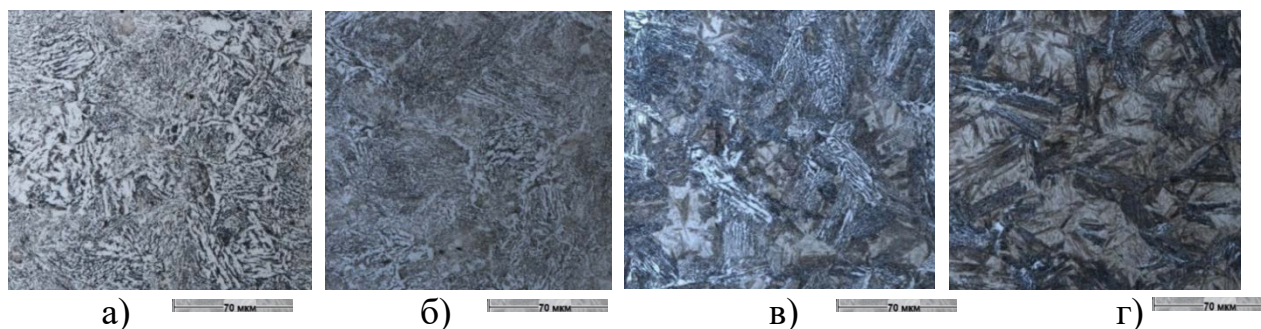


Рис. 3. Микроструктура состава № 3, при скоростях охлаждения:
(а) $V = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, б) $V = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, в) $V = 1,0 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, г) $V = 2,0 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

По результатам дилатометрических исследований установлено, что на опытных химических составах обеспечивается получение требуемой микроструктуры в интервале скоростей ускоренного охлаждения $2 - 3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$. В диапазоне скоростей охлаждения до $2 - 3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ наиболее равномерное распределение микроструктуры нижнего бейнита с наличием небольшого количества мартенситной фазы получено на образцах стали состава № 1. Учитывая получение на составах № 2 и № 3 повышенного количества мартенситной фазы уже при скорости $2 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, а также наличия более грубой структуры бейнитных пакетов и мартенсита, наиболее перспективным составом следует принять состав № 1.

Литература:

1. Цзинь, Ц. Испытание и применение бейнитных рельсов с массой погонного метра 60 кг для железных дорог для тяжеловесного движения / Ц. Цзинь // *Railway Sciences*, 2023. – № 4.
2. Опыт производства рельсов из стали бейнитного класса на НТМК / А.В. Кушнарев, А.А. Киричков, А.Б. Добужская А.Б. [и др.] // *Сталь*. – 2005. – №6. – С. 131 – 133.
3. Разработка технологии производства рельсов из бейнитной стали / В.И. Ворожищев, В.В. Павлов, Л.В. Корнева [и др.] // *Сталь*. – 2005. – № 2. – С. 71 – 74.
4. Свойства и микроструктура бейнитных рельсов / В.В. Павлов, Л.В. Корнева, В.В. Могильный [и др.] // *Материалы II всероссийского научно-технического семинара: Сборник научных докладов*. – 2006. – С. 198 – 204.
5. Осколкова, Т.Н. Мировой опыт производства рельсов из сталей с бейнитной структурой / Т.Н. Осколкова, А.М. Юнусов // *Вестник РАЕН*, 2024. – № 26.
6. Опыт производства рельсов из бейнитной стали марок 30ХГ2С2АФМ и 30ХГ2САФН / А.М. Юнусов, Е.В. Полевой, Г.Н. Юнин, Т.Н. Осколкова // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*, 2025. – № 2
7. The bainitic steels for rails applications / I. Hlavatý, M. Sigmund, L. Krejčí, P. Mohyla // *Materials Science Engineering*. – 2009. – V.16(4), pp. 44 – 50.
8. Zajac, S. Characterisation and quantification of complex bainitic microstructures in high and ultra-high strength linepipe steels / S. Zajac, V. Schwinn, K-H. Tacke // *Materials Science Forum*. – 2005. – Vol. 500-501, pp. 387 – 394.
9. Research on the Microstructures and Mechanical Properties of Bainite / J. Qiu, M. Zhang, Z. Tan, G. Gao [et al] // *Martensite Rail Treated by the Controlled-Cooling Process. Materials*. – 2019, № 12, P. 3061.

ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ ПОСЛЕ РКУП И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ГИДРОПРЕССОВАНИЯ

Яшарова Е.В.^{1,2}, Гангало А.Н.^{1,3}

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»

³ФГБНУ «Институт физики горных процессов»

Равноканальное угловое прессование (РКУП) – один из наиболее распространенных методов интенсивной пластической деформации, направленный на измельчение структуры до ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния в прутковых материалах из алюминия, меди, титана и различных сплавов [1]. В то же время метод РКУП применим только для структурного изменения материала, поскольку не является формообразующим. Более того, заготовки после обработки РКУП имеют заниженные значения критического напряжения на сдвиг и сдвигового напряжения разрушения, что ограничивает достигаемый уровень прочности [2]. Для преодоления этих недостатков после формирования УМЗ-структур методом РКУП применяют постобработку с применением традиционных методов обработки давлением [3, 4]. Целью данной работы является исследование влияния гидропрессования на прочность и механизм разрушения ультрамелкозернистой меди, полученной равноканальным угловым прессованием.

В исследовании использовали пруток из меди чистотой 99,97%. Для формирования УМЗ состояния в медных заготовках выполнили 12 циклов РКУП через матрицу с углом пересечения каналов $\Phi=90^\circ$ с поворотом заготовки вокруг своей оси на 90° перед каждым последующим циклом деформирования. В результате предварительной обработки РКУП в заготовках была сформирована однородная равноосная УМЗ структура с размером зерна порядка 0,2 мкм с высокоугловыми границами разориентации зерен. Микроструктура исследовалась с использованием просвечивающей электронной микроскопии представлена на рис. 1 [5].

Влияние последующего гидропрессования на прочность УМЗ меди исследовали в диапазоне логарифмической деформации $\epsilon = 0,3 \dots 1,2$. Для этого проводили испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 на цилиндрических образцах №7 ($d_0 = 5$ мм) тип III с пятикратной длиной разрывной части. Помимо предела прочности определяли эффективные значения сдвигового напряжения разрушения τ_0 по критерию эллипса, используя данные по пределу прочности σ_b и угла разрушения θ .

Результаты испытаний на растяжение представлены на рис. 2 [5, 6]. Видно, что в исходном УМЗ состоянии после РКУП прочностные свойства меди имеют минимальные значения: предел прочности составляет $\sigma_b = 434$ МПа, сдвиговое напряжение разрушения $\tau_0 = 233$ МПа. Применение гидропрессования приводит к увеличению прочностных характеристик УМЗ меди до деформации $\epsilon = 0,9$:

предел прочности повышается до $\sigma_b = 477$ МПа, а сдвиговое напряжение разрушения до $\tau_0 = 324$ МПа. При дальнейшем повышении деформации происходит снижение прочностных характеристик, что связано с падением плотности дислокаций вследствие значительного разогрева меди под действием работы деформации [6].

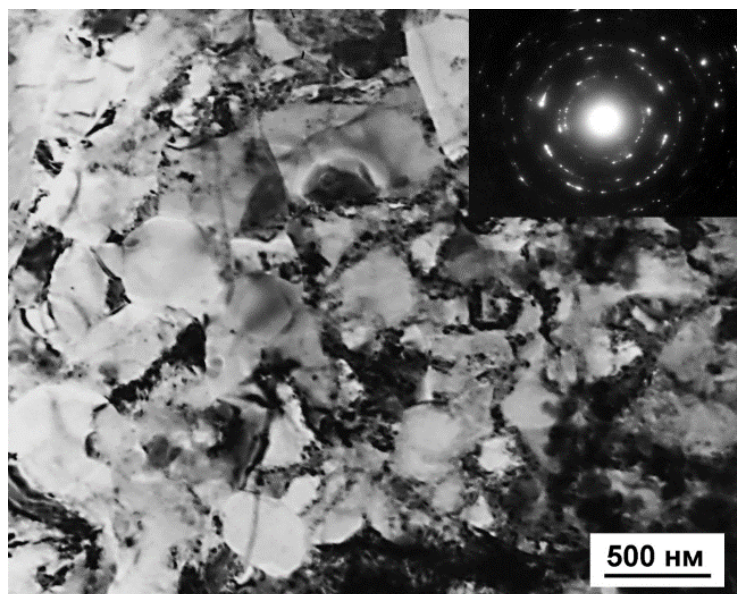


Рисунок 1 – Микроструктура УМЗ меди, сформированная РКУП.

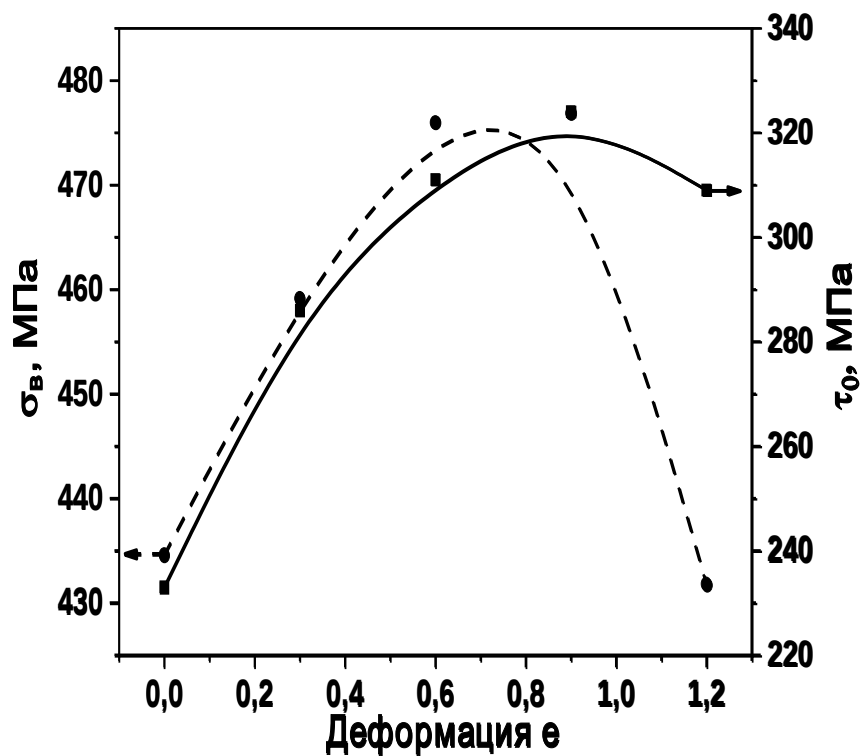
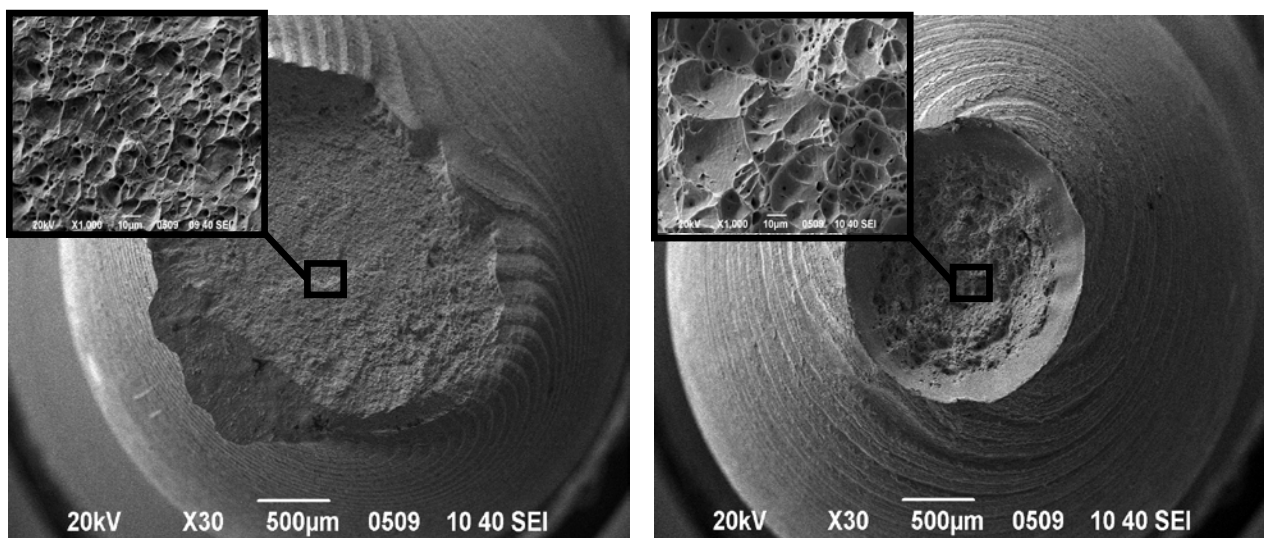


Рисунок 2 – Влияние деформации гидропрессования на прочность σ_b и сдвиговое напряжение разрушения τ_0 УМЗ меди, полученной РКУП

Поверхность разрушения при растяжении УМЗ меди исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии. На рис. 3 представлены макрорельеф и микрорельеф центральной части поверхности разрушения в исходном состоянии (после РКУП) и после обработки гидропрессованием с деформацией $\epsilon = 0,9$ (максимальная прочность) [7].

Анализ поверхности разрушения показал, что для обоих случаев происходит вязкое разрушение с формированием волокнистой зоны. После предварительной обработки РКУП поверхность разрушения имеет одну волокнистую зону разрушения, состоящую из ямок параболической формы, что свидетельствует о механизме разрушения по типу сдвига (рис. 3, а). После постобработки гидропрессованием поверхность разрушения становится более рельефной; по наружной части формируется вторая зона разрушения – зона среза (рис. 3, б). Волокнистая зона состоит из ямок равноосной формы, что свидетельствует о механизме разрушения по типу нормального отрыва. Смена механизма разрушения после постобработки гидропрессованием обеспечивается за счет значительного повышения сдвигового напряжения разрушения.



а

б

Рисунок 3 – Макрорельеф и микрорельеф центральной части поверхности разрушения при испытаниях на растяжение меди

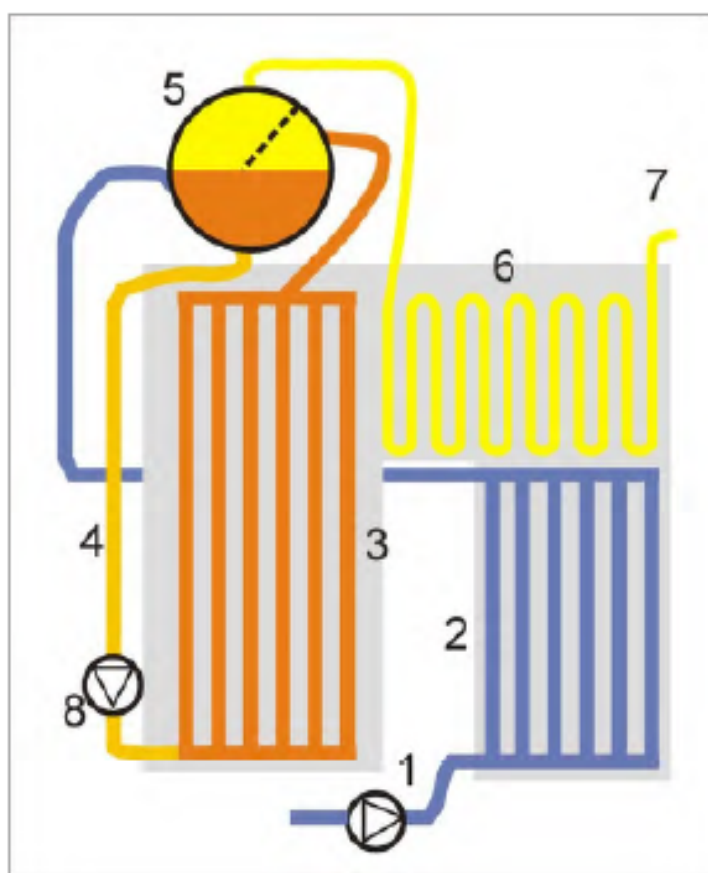
а – предварительная обработка РКУП; б – постобработка гидропрессованием.

Таким образом, исследовано влияния гидропрессования на прочность и механизм разрушения ультрамелкозернистой меди, полученной равноканальным угловым прессованием. Показано, что максимальное повышение прочности достигается при обработке гидропрессованием с деформацией $\epsilon = 0,9$, предел прочности повышается на 10%, сдвиговое напряжение разрушения на 40%, при этом механизм разрушения меняется со сдвигового на механизм нормального отрыва.

Литература:

1. Valiev, R.Z. Ultrafine-Grained Materials / R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, M. Kawasaki, T.G. Langdon. – Cham: Springer International Publishing, 2024. – 170 p.
2. Яшарова, Е. В., Повышение сдвигового напряжения разрушения субмикрористаллической меди методом гидроэкструзии / Е. В. Яшарова, А. Н. Гангало, В. Д. Суровицкий, В. В. Бурховецкий // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 1. С. 124-132.
3. Сенникова, Л. Ф. Влияние разовой степени деформации гидроэкструзией на механические свойства сплава АМц, предварительно обработанного равноканальным угловым прессованием / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, Е. А. Свиридова [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. – № 4(87). – С. 71-76.
4. Сенникова, Л. Ф. Структура и твердость меди М0б после деформационно-термической обработки при комнатной и криогенной температурах / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, Г. К. Волкова [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2026. – № 1(125). – С. 36–43.
5. Гангало, А. Н. Влияние гидропрессования на механические свойства ультрамелкозернистой меди / А. Н. Гангало, Е. В. Яшарова, Л. Ф. Сенникова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2025. – № 10. – С. 19-27.
6. Сенникова, Л.Ф. Влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства меди М0б, предварительно обработанной равноканальным угловым прессованием / Л. Ф. Сенникова, А. Н. Гангало, В. М. Ткаченко [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 3(123). – С. 31-37.
7. Gangalo, A. N. Effect of Hydrostatic Extrusion on the Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Copper / A. N. Gangalo, E. V. Yasharova, L. F. Sennikova [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2026. – Vol. 2026, No. 1. – P. 147–154.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Хохлова М.Е., Герцык С.И.

Московский политехнический университет

Практически все нагревательные и термические печи черной металлургии и машиностроительной отрасли промышленности оснащены системами рекуперации тепла уходящих газов, что приводит не только к значительной экономии топлива, но и снижению количества образующихся продуктов горения. Экономия топлива при подогреве воздуха горения и/или низкокалорийного топлива можно оценить по соотношению [1]:

$$\Xi = \eta_{\text{ут}} \cdot \frac{\frac{I_{\text{yx}}}{I_0}}{1 - \frac{I_{\text{yx}}}{I_0}(1 - \eta_{\text{ут}})} \cdot 100\%,$$

где $\eta_{\text{ут}} = Q_{\text{физ}}/Q_{\text{ух}}$ – степень утилизации тепла, характеризующая КПД рекуператора, $Q_{\text{физ}}$ – физическое тепло подогрева воздуха / топлива, $Q_{\text{ух}}$ – тепло, уносимое уходящими газами; $I_0 = Q_{\text{н}}^p/v_{\text{д}}$ – энтальпия дымовых газов при температуре горения топлива; I_{yx} – энтальпия дымовых газов, уходящих из печи. $Q_{\text{н}}^p$ – теплота сгорания топлива, $v_{\text{д}}$ – объем образующихся дымовых газов (продуктов горения топлива).

При подогреве воздуха до 300-400 °С экономия топлива составляет не менее 12 – 15 %. Кроме того, использование тепла уходящих газов снижает удельные расходы тепла, повышает КПД печного агрегата, а также снижает температуру дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу, что немаловажно с экологической точки зрения.

Вместе с тем известно, что подогрев компонентов горения значительно повышает температуру в зоне горения (калориметрическую температуру), что не может не сказываться на механизме образования оксидов азота (термических) в уходящих газах и, как следствие этого, загрязнении продуктов горения топлива оксидами азота NO_x [2,3]. Например, известно, что при температуре подогрева воздуха до 400-500 °С концентрация оксидов азота в уходящих газах возрастает в несколько раз (в 4 – 5) [3].

При проектировании новых нагревательных и термических печей и реконструкции старых проектировщикам довольно часто приходится иметь дело с взаимоисключающими друг друга требованиями: с одной стороны высокая производительность печного агрегата достигается при высокой температуре печи, которая может быть достигнута при подогреве компонентов горения, с другой стороны, увеличение температуры горения приводит к росту концентрации вредных веществ в уходящих дымовых газах.

Следовательно, утилизация тепла дымовых газов не всегда экономически оправдана, так как валовые выбросы оксидов азота могут оказаться выше при

подогреве компонентов горения несмотря на значительную экономию топлива, поскольку очистка продуктов горения требует существенных капитальных вложений. Поэтому определение экономической целесообразности использования теплоты продуктов горения представляется весьма актуальной.

В нагревательных и термических печах металлургии и машиностроения в качестве теплоутилизационных устройств используются теплообменники рекуперативного типа, обеспечивающие подогрев компонентов горения обычно до 400 – 500 °С.

В процессе нагрева металлических изделий в технологических процессах происходят значительные энергетические потери в результате неполного использования тепла, выделяемого топливом при сгорании.

В термических печах температура нагреваемого металла обычно составляет 800-1000 °С (за исключением отпускных печей), температура газов в рабочем пространстве печи в таком случае не превышает 850-1100 °С. В нагревательных печах конечная температура нагреваемого перед прокаткой, ковкой и штамповкой металла колеблется от 1100 до 1250 °С, а продуктов горения в рабочем пространстве печей – от 1200 до 1450 °С. Температура уходящих из печей камерного типа дымовых газов приближается к конечной температуре нагрева металла.

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печей, имеют высокую температуру и поэтому уносят с собой значительное количество теплоты, которое тем больше, чем выше их температура и чем ниже коэффициент использования тепла и топлива в печи.

В нагревательных печах с уходящими дымовыми газами теряется около 60-65% вводимой в печь теплоты – таблица 1. Снизить эти потери можно путем возврата части теплоты в печь (рекуперации), уменьшения их количества за счет снижения коэффициента избытка воздуха горения (до оптимального значения) и подсосов воздуха в рабочее пространство печи из окружающей среды через загрузочные окна и неплотности каркаса.

Таблица 1. Характеристика промышленных печей [4]

Тип печей	Температура рабочего пространства, °С	Полезно используемое тепло, %	Температура уходящих газов, °С	Потери теплоты с уходящими газами, %
Нагревательные колодцы	1300 - 1500	20 - 30	1250 - 1350	55 - 60
Методические прокатные	1300 - 1450	30 - 40	900 - 1100	30 - 45
Термические камерные	850 - 1050	18 - 20	800 - 950	35 - 50
Термические методического типа	850 - 1000	25 - 35	500 - 700	25 - 35
Кузнечные камерные	1200 - 1300	12 - 17	1100 - 1200	50 - 60

Возврат части теплоты дымовых газов в печь может осуществляться путем предварительного подогрева топлива или воздуха перед их подачей в горелочные устройства, что позволяет повысить коэффициент использования теплоты печного агрегата, температуру и качество горения топлива, а также снизить расход топлива. Увеличение коэффициента использования теплоты уходящих газов приводит к существенному возрастанию капитальных и эксплуатационных затрат, из-за чего устанавливают температурный предел, ниже которого уменьшать температуру дымовых газов нецелесообразно.

Предварительный подогрев топлива и/или воздуха уходящими газами обычно осуществляется в рекуперативных теплообменниках. Эффективность их работы определяется тем, что единица теплоты, отобранная у газа и вносимая в печь с подогретым воздухом и/или топливом (единица физической теплоты), оказывается значительно ценнее единицы теплоты, полученной в печи в результате сгорания топлива, так как теплота подогретого воздуха (газа) не влечет за собой потерь теплоты с уходящими газами. Известно [3], что использование подогретого воздуха вместо холодного улучшает качество горения топлива и, кроме того, снижает его химический и механический недожог. Ценность единицы физической теплоты тем больше, чем ниже коэффициент использования топлива и чем выше температура уходящих дымовых газов.

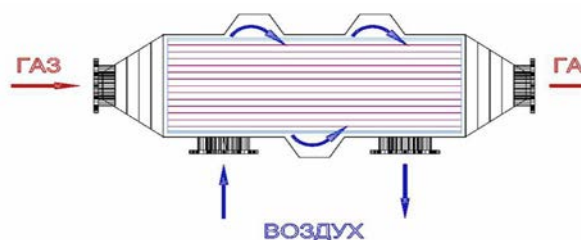


Рисунок 1 – Схема рекуперативного теплообменника

В рекуператорах теплообмен между теплоносителями (дымовые газы и воздух горения) осуществляется в стационарном режиме через разделяющую их стенку. Рекуператор устанавливается на пути уходящих газов из печи в дымовой боров, а воздух подается через смежные полости рекуператора и нагревается уходящими газами, проходящими вдоль нагретых стенок или труб. В зависимости от материала, из которого сделаны элементы рекуператора, последние подразделяют на металлические и керамические.

Металлические рекуператоры изготавливают из серого чугуна, углеродистой стали, а также из жаропрочных чугунов и сталей, хорошо противостоящих действию высоких температур. Металлические рекуператоры значительно компактнее керамических, герметичны, однако имеют недостаточную стойкость при высоких температурах (от 550 °С).

Элементы керамических рекуператоров изготавливают из шамота, карборунда и карбошамота. Их ценным свойством является возможность работы при необходимости подогрева воздуха свыше 500-700 °С, а существенный недостаток – низкая газоплотность, приводящая к утечкам

горячего компонента.

Рекуператоры различают по схеме относительного движения теплоносителей – противоточные, прямоточные и с перекрестным движением сред [1].

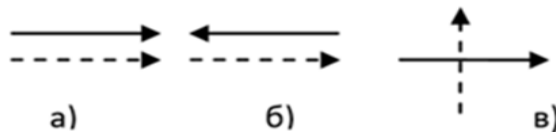


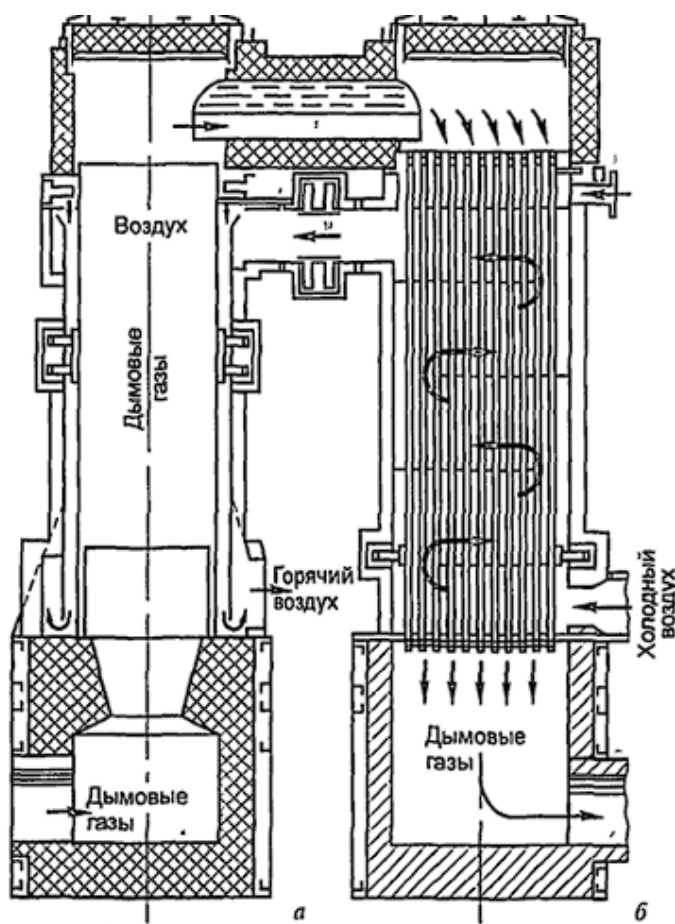
Рисунок 2 – Схемы движения теплоносителей: а) – прямоток, б) – противоток, в) – перекрестный ток)

Одним из критериев выбора теплоутилизационного оборудования является его предполагаемая эффективность, и характер влияния его режимных параметров на основной рабочий процесс. Решающее значение имеет его техническая надежность и улучшение энерго-экологических показателей в целом. Существующие сегодня конструкции рекуператоров имеют весьма серьезные недостатки: большая металлоемкость; высокая стоимость и большой срок окупаемости; сложность или невозможность ремонта; низкая термопластичность (т.е. склонность к появлению термических напряжений, приводящих к короблению и разрушению конструкции); высокое аэродинамическое сопротивление; склонность к зашлаковыванию (зарастанию рабочих зазоров шлаками). Тем не менее, подавляющее большинство нагревательных печей металлургии и машиностроения оснащены рекуператорами, так как утилизация тепла дымовых газов приводит к ощутимой экономии топлива.

В целях оптимизации процесса утилизации тепловой энергии уходящих газов и высокого подогрева компонентов горения применяются рекуператоры, состоящие из двух функциональных секций: конвективной и радиационной (рис. 3).

В радиационно-конвективных рекуператорах уходящие дымовые газы последовательно проходят сначала радиационную секцию, а затем конвективную. Каждая из них обслуживает соответствующую температурную зону: в радиационной секции температура дымовых газов понижается до 750–850 °С, в конвективной – до 350–450 °С. Таким образом, достигается практически полное использование теплоты дымовых газов от температуры 1100–1600 до 350–450 °С.

Выполнена серия теплотехнических расчетов нагревательных и термических печей по стандартным методикам [5], отапливаемых газовым топливом различной теплотворной способностью $Q_H^p = 16,0 - 35,0$ МДж/м³, включающих в себя расчеты горения топлива, теплопередачу, тепловые балансы печей, оснащенных системой подогрева воздуха горения и без нее, определены основные показатели работы печей: КПД, удельные расходы тепла и топлива, расход топлива в единицах условного топлива.



а – радиационная секция, *б* – конвективная секция
Рисунок 3 – Радиационно-конвективный рекуператор:

Результаты расчетов показали, что утилизация тепла дымовых газов (подогрев воздуха горения до 350 – 400 °С) приводит к сокращению расхода топлива на 12 – 15%, повышению теплового КПД печи на 3 – 5 %, снижению удельных затрат тепла в среднем на 15 %.

Литература:

1. Филимонов, Ю. П. Топливо и печи / Ю. П. Филимонов, Н. С. Громова – Москва : Металлургия, 1987. – 320 с.
2. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал – Ленинград : «Недра», 1988. – 311 с.
3. Шульц, Л. А. Пути решения экологических проблем при нагреве и термической обработке стального проката и деталей. В сб. Металлургия, XXI век / Л. А. Шульц, Ю. М. Бунзель, В. Ф. Третьяков – Москва : Металлургия, 1991. – С. 253-256.
4. Лисиенко, В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. Кн. 1: Справочник / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – Москва : «Теплотехник», 2003. – 606 с.
5. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – Москва : «Теплотехник», 2004. – 400с.

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ЖЕЛОБОВ И СЛИВНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

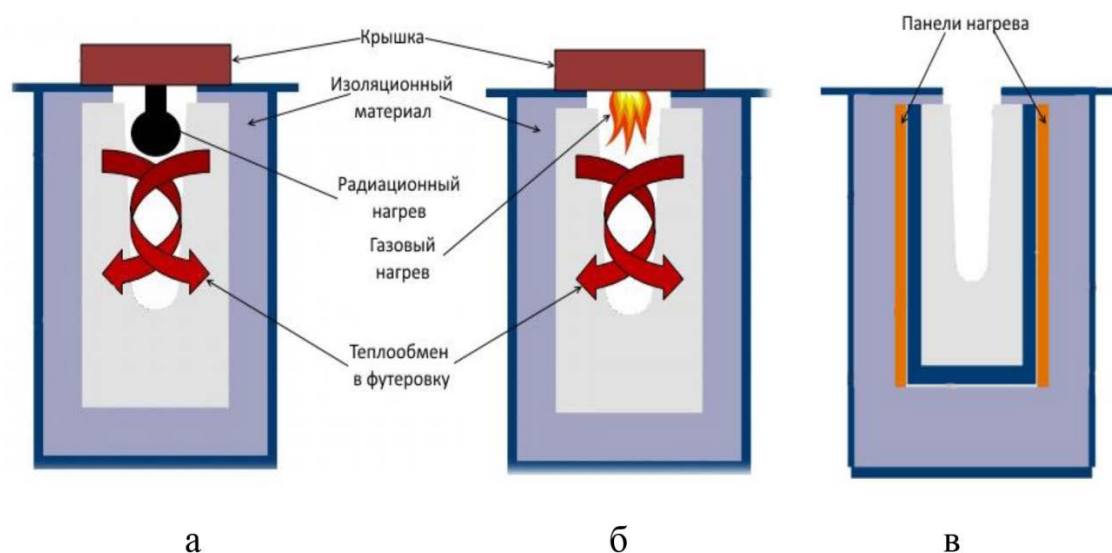
Сиволдаев Н.А., Кашаев В.В.

Донецкий национальный технический университет

Наиболее перспективным участком для применения предварительного нагрева желобов и сливных отверстий служат литейные цеха алюминиевых производств, в которых широко используются ПЛА (плавильно-литейные агрегаты) для производства алюминиевых полуфабрикатов. Плавильно-литейные агрегаты состоят в основном из: печи/миксера для переплава/приготовления расплавов, системы литейных желобов и литейной машины.

Важная и актуальная задача на сегодня – это предварительный подогрев (нагрев) системы желобов перед выливкой расплава алюминия из печи/миксера в литейную машину для того, чтобы сократить потери расплава алюминия в начале литья и уменьшить тепловые удары по огнеупорам, и, таким образом, повысить срок их службы.

При литье расплавов существует проблема тепловых потерь расплава в литейных желобах в начале литья, когда холодный огнеупор отбирает тепловую энергию у расплава алюминия. И часто снижение температуры от печи до литейной машины достигает более 3 °С для желобов на 1 м его длины. Следовательно, примерно 3 % полуфабрикатов уходит в переплав по причине неудовлетворительного качества [1].



а – радиационный нагреватель;

б – пламенный нагреватель;

в – встроенные нагреватели от компании «Pyrotek»

Рисунок 1 – Способы предварительного нагрева

Способы предварительного нагрева, приведенные на рис. 1, применяют для компенсации потерь и предварительного прогрева огнеупоров желобов. В частности, на рис. 1, а показан радиационный нагреватель, размещенный в крышке желоба, на рисунке 1, б – пламенный нагреватель, а на рис. 1, в – встроенные нагреватели от компании «Pyrotek», нагревающие огнеупор за счет теплопроводности от нагревательного элемента.

Но приведенные выше способы нагрева относительно дорогие, а пламенный подогрев понижает срок службы огнеупорных материалов из-за их перегрева и помимо этого, эти способы проблематично применить для сложной и разветвленной системы желобов. Конвективный нагрев с помощью нагревательных элементов в крышке желоба или его торце дает возможность подавать в желоб горячий воздух заданной температуры и направлять его вдоль желоба сложной формы на достаточно большое расстояние, подогревая (нагревая) огнеупор, независимо от формы и геометрии самого желоба.

Точное предварительное нагревание желобов является важным фактором в успехе литья, особенно в случае глубоких желобов, которые более склонны к остыванию металла.

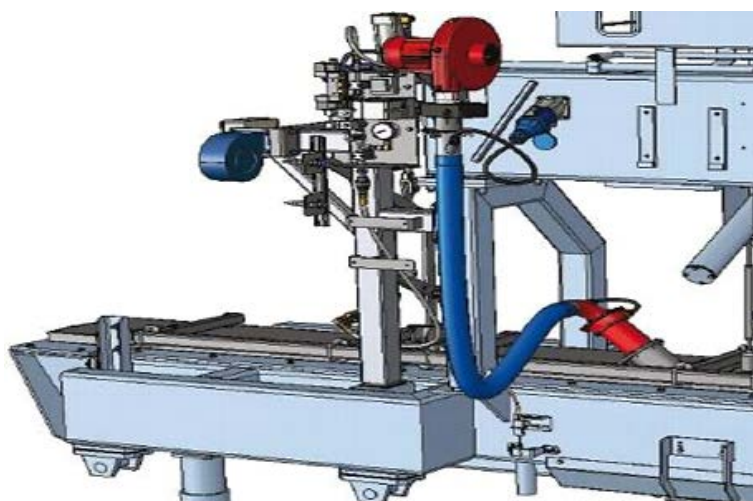


Рисунок 2 – Электрическая воздуходувка

Электровентилятор (рис. 2) уже давно используется в различных случаях предварительного нагрева желобов. Такое оборудование, как правило, мобильно, т.к. оно способно обслуживать различные части литейной линии.

В случае распределения желобов, вентилятор предпочтительно фиксируется, с одной единицей на холодном конце для коротких желобов (от 1 до 3 секций) и двух блоков, по одному на каждом конце, а для длинных желобов (от 4 до 7 секций). Они заменяют более стандартные газовые горелки (1 на одну секцию) с единичной мощностью (13 кВт), чтобы обеспечить температуру воздуха 650 °С и обеспечивают хорошую циркуляцию воздуха по всему желобу, система желобов накрывается крышкой и должна обеспечить достаточное уплотнение воздуха. Так как электрические нагнетатели

обеспечивают однородный предварительный нагрев, огнеупорную футеровку не нужно нагревать напрямую, что продлевает срок их службы.

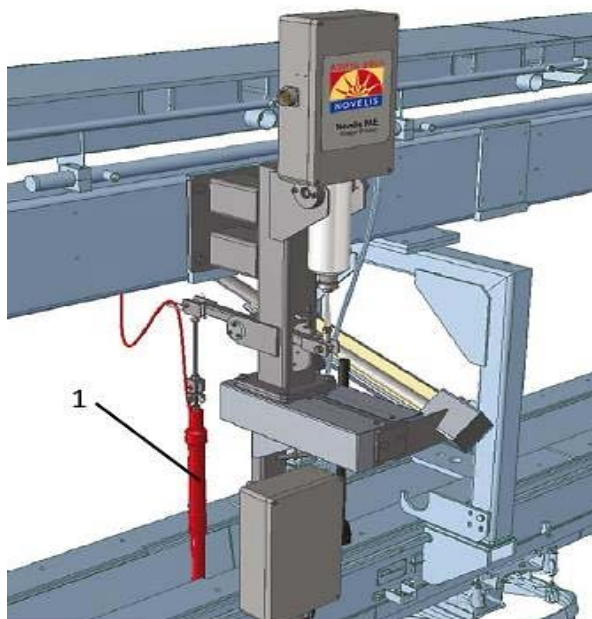


Рисунок 3 – Локальный прогрев

Эта технология предварительного нагрева (рис. 3) может быть объединена с разъемом на месте, предварительно подогревающим устройство (2 кВт), делая его практически 100 % эффективным в достижении необходимой локальной температуры предварительного нагрева в требуемое время: 400 °С за 45 минут у основания каждой струи. Нагревание может также сохраняться во время литья при низких металлических скоростях потока. На вышеприведенном рис. 3 пункт 1 является вертикально расположенным мини-нагревателем с оболочкой Sialon для безопасного погружения в жидком металле [2].



Рисунок 4 – ZEN подогреватель

Система предварительного нагрева Pyrotek ZEN – это компактная, мобильная система принудительной подачи воздуха, используемая для предварительного нагрева литейных желобов.

Подогреватель Pyrotek ZEN – это переносной воздушнонагреватель, способный подогревать огнеупорные системы и другие компоненты до 540 °С (1004 °F). Он доступен в различных конфигурациях для удовлетворения требований заказчика к предварительному нагреву благодаря специально изготовленным монтажным кронштейнам, предназначенным для установки на любой фланец или литейный желоб. Высокотемпературные покрывала и распределительные рамы доступны для более крупных компонентов, чтобы приспособить для различных случаев, повышая эффективность ZEN до значительно более высокой производительности, чем у традиционного газового агрегата.

Проверенная в производственных условиях значительная реальная годовая экономия достигается за счет использования системы впрыска подогревателя ZEN от «Pyrotek». Улучшения процесса и безопасность реализуются путем замены газовых подогревателей и другого традиционного оборудования [3].

Анализ установок для предварительного нагрева огнеупорных желобов показал, что принудительный конвекционный нагрев выигрывает у встроенных нагревателей в части соотношения «цена-эффективность», у пламенного нагрева в части повышения ресурса использования огнеупоров, у радиационного нагрева в части простоты и надежности.

Литература:

1. Мамина, Л. И. Теоретические основы литейного производства: конспект лекций / Л. И. Мамина, Е. М. Лесив, Т. Р. Гильмашина. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 285 с.
2. Современные технологии для Новой России! Литейное оборудование Novelis PAE // Глобалтек : сайт компании. – Санкт-Петербург, 2026. – URL: <https://gl-tech.ru/products/category/376588> (дата обращения: 01.05.2026).
3. ZEN Preheater and ZEN Heater System. Pyrotek improving performance Aluminium Solutions // Pyrotek Co. : сайт компании. – Spokane, 2026. – URL: <https://www.pyrotek.com/DeliverFile/c0e0d39f454d0a5e480cf6f1f3c7528b> (дата обращения: 03.05.2026).

СИСТЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛОЛОМА В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Мельниченко М.В., Гнитиёв П.А.

Донецкий национальный технический университет

В статье рассмотрены современные подходы к предварительному нагреву шихты в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) с использованием теплоты отходящих газов. Проанализированы шахтные, камерные и проходные системы предварительного подогрева различных производителей (Fuchs, Primetals SIMETAL EAF Quantum, ECOARC, Consteel®, EPC и др.). Показаны преимущества и ограничения интеграции подогревателей в технологический цикл. Особое внимание уделено конструктивным решениям, обеспечивающим непрерывность процесса, повышение энергоэффективности, снижение удельного расхода электроэнергии и экологическую безопасность. Приведены реальные промышленные данные, технические таблицы сравнения систем и показатели энергосбережения.

В условиях современного металлургического производства ключевую роль играет дуговая сталеплавильная печь (ДСП/ЕАФ) [1-3]. Выплавка стали в таких агрегатах основана на переплаве шихты (преимущественно металлолома) за счёт тепловой энергии электрической дуги. Спецификой ДСП является присутствие в отходящих газах значительных долей оксида углерода (СО) и кислорода, что требует их дожигания для повышения теплового КПД и снижения выбросов. Температура уходящих газов в фазе плавления составляет 1100–1300 °С, в окислительный период — 1350–1550 °С. Без утилизации эти газы уносят 15–25% всей вводимой энергии (80–120 кВт·ч/т жидкой стали).

Одним из наиболее перспективных направлений энергосбережения является предварительный нагрев металлического лома теплотой отходящих газов. Это позволяет частично вернуть энергию в технологический цикл, компенсировать тепловые потери, снизить удельное потребление электроэнергии на 50–100 кВт·ч/т (13,5–20 %), сократить время плавки и повысить производительность. Дополнительно снижается расход электродов (до 15–20 %), кислорода и углерода, уменьшается пылевыведение и тепловая нагрузка на футеровку.

Подогрев шихты реализуется в камерных, шахтных и проходных (конвейерных) устройствах, интегрированных с ДСП. Наиболее распространены и эффективны шахтные и конвейерные системы, позволяющие нагревать лом до 300–800 °С.

Основные конструкции систем подогрева.

Fuchs Systemtechnik (ныне часть Primetals Technologies) — одна из пионерских разработок (с 1988 г.). Шахта размещается над сводом печи. До 50–60 % шихты подаётся через шахту. Нагрев осуществляется теплотой отходящих газов и дополнительными газокислородными горелками.

SIMETAL EAF Quantum (Primetals Technologies) — современное развитие шахтной технологии с плоской ванной (flat bath operation). Используются водоохлаждаемые удерживающие пальцы. Система позволяет достигать удельного расхода электроэнергии ниже 300 кВт·ч/т.

ECOARC (JP Steel Plantech) — вертикальная перегородка в зоне действия дуги, обеспечивающая непрерывный контакт лома с жидким металлом. Промышленные данные показывают удельный расход электроэнергии около 210 кВт·ч/т.

Consteel® (Tenova) — конвейерная система непрерывного подогрева. Лом транспортируется через туннель противотоком газов. Более 80 установок по всему миру.

ЕРС (CVS MAKINA / KR Tec) — завалочная камера с толкателем, обеспечивающая непрерывность процесса.

Технические характеристики и сравнение систем [4].

Таблица 1. Сравнение основных систем предварительного подогрева лома

Параметр	Традиционная ДСП (без подогрева)	Fuchs Shaft	EAF Quantum	ECOARC	Consteel®
Тип системы	—	Шахтная	Шахтная	Шахтная	Конвейерная
Температура нагрева лома, °C	—	300–600	400–700	500–800	300–650
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	380–450	280–340	280–310	210–280	290–350
Экономия электроэнергии, кВт·ч/т	—	60–100	70–120	80–150	50–100
Время плавки (tap-to-tap), мин	55–70	40–50	33–45	35–50	40–55
Рост производительности, %	—	15–25	20–30	15–25	10–25
Расход электродов, кг/т	1,8–2,5	1,2–1,7	0,65–1,4	1,0–1,5	1,2–1,7
Количество установок (примерно)	—	>30	>20	>10	>80

Таблица 2. Техничко-экономические показатели

Показатель	Традиционная ДСП	Система с подогревом (средние значения)	Эффект, %
Удельный расход электроэнергии	400 кВт·ч/т	290–320 кВт·ч/т	-20...-27
Расход электродов	2,0 кг/т	1,3–1,6 кг/т	-20...-35
Расход кислорода	35–45 м³/т	25–35 м³/т	-15...-25
Пылевыведение	100 %	70–80 %	-20...-30
Снижение CO ₂ -эмиссий (за счёт энергии)	—	—	-15...-25
Окупаемость дополнительных инвестиций	—	1,5–3 года	—

Таблица 3. Сравнение по типу подогрева (тепловая эффективность)

Тип системы	Эффективность утилизации тепла отходящих газов, %	Максимальная температура лома, °C	Непрерывность процесса	Примечание
Корзиночный	25–35	200–300	Периодическая	Простейший
Шахтный (Fuchs, Quantum)	50–65	400–800	Полунепрерывная	Высокая эффективность
ECOARC	60–70	до 800	Полунепрерывная	Лучшая теплопередача
Consteel® (конвейер)	45–60	300–650	Полностью непрерывная	Лучшая стабильность процесса

Преимущества:

- значительное энергосбережение и рост производительности;
- улучшение экологических показателей;
- удаление влаги и летучих веществ из лома (снижение рисков взрывов);
- увеличение срока службы футеровки и электродов.

Ограничения:

- необходимость качественной подготовки лома;
- риск образования диоксинов (решается вторичным дожиганием $>850^{\circ}\text{C}$ и закалкой газов);
- дополнительные капитальные затраты;
- зависимость эффективности от состава шихты.

Шахтные и конвейерные системы предварительного нагрева металлолома (Fuchs, SIMETAL EAF Quantum, ECOARC, Consteel®, EPC и др.) являются высокоэффективным способом повышения энергоэффективности и экологичности дуговых сталеплавильных печей. Различные конструктивные решения позволяют адаптировать технологию под конкретные условия производства. Основные преимущества — значительное снижение расхода электроэнергии, увеличение производительности, утилизация вторичных энергоресурсов и снижение воздействия на окружающую среду [4-6].

Дальнейшее совершенствование связано с оптимизацией подготовки лома, автоматизацией, цифровизацией процессов и интеграцией с системами электромагнитного перемешивания.

Литература:

1. The most advanced power-saving technology in EAF – Introduction to ECOARC // JP Steel Plantech. URL: <https://steelplantech.com/assets/pdf/technology/The-most-advanced-power-saving-technology-in-EAF-Introduction-to-ECOARC.pdf> (дата обращения: 03.05.2026).
2. Consteel® EAF // Tenova S.p.A : сайт компании. – Castellanza, 2026. – URL: <https://tenova.com/technologies/consteelr-eaf> (дата обращения: 04.05.2026).
3. An overview of the operation of the EAF Quantum // Millennium Steel. 2025.

URL: <https://www.millennium-steel.com/wp-content/uploads/2025/03/7e5fe9c4-474b-48f6-ad1c-2700faa34bc5.pdf> (дата обращения: 03.05.2026).

4. Бирюков, А. Б. Утилизация теплоты газов, отходящих из дуговой сталеплавильной печи, с целью предварительного подогрева металлолома // Вестник Донецкого национального технического университета. 2020 – № 2 (20) – С. 26–32.

5. ACEEE. Innovative Energy Conservation through Scrap Pre-heating in an Electric Arc Furnace. 2013. URL: https://www.aceee.org/files/proceedings/2013/data/papers/1_175.pdf (дата обращения: 06.05.2026).

6. Scrap preheating for iron and steel // CTC-N. URL: <https://www.ctc-n.org/technologies/scrap-preheating-iron-and-steel> (дата обращения: 01.05.2026).

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ОБРАЗОВАНИЯ NO_x В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ

Уколов А.В., Кашаев В.В.

Донецкий национальный технический университет

Главные перспективы развития топливосжигающих технологий и теплогенераторов, в частности связан с двумя основными факторами: экологичность и энергоэффективность технологии, а также разработка и исследование новых топливосжигающих технологий. Поэтому целью работы и является исследование влияние изменения расхода топлива на процессы горения и образования NO_x в теплогенераторах.

Принимая во внимание, что расчетные методы рабочего процесса в камерах сгорания теплогенератора имеют недостаточную степень точности и достоверности, и поэтому все расчеты в статье проводились с помощью численного моделирования. Кроме того, при расчетах необходимо рассчитывать совместные процессы горения и теплообмена, которые очень сложны. Еще одной сложностью является совместный учет и влияние этих процессов друг на друга.

Следует заметить, что существуют разные методы расчета влияния геометрии и конструктивных характеристик камеры сгорания, а также режимных параметров на интенсивность горения и выгорания топлива по длине и поперечному сечению камеры сгорания, но они имеют достаточно абстрактный характер. Другой сложностью является то, что существуют различные конструкции и режимные параметры, однако они не обладают достаточной универсальностью, и следовательно использование их в других расчетах камер сгорания ограничено.

Все моделирование в статье базировалось на формулах, приведенных в работах [1-5].

В начале опишем математическую модель процессов.

Для определения процессов горения и тепломассообмена в камерах сгорания, как и в любых топливосжигающих установках необходимо учитывать уравнения неразрывности, уравнение сохранения энергии и массы. Математический вид этих законов описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d\omega}{d\tau} + \omega \operatorname{div} \omega = g \cdot \left(1 - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p\right) + v \cdot \left(\nabla^2 \omega + \frac{1}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \omega\right); \quad (1)$$

$$\frac{dc}{d\tau} + \omega \operatorname{div} c = \omega_{\text{исп}} - \omega_x + \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c); \quad (2)$$

$$\frac{dt}{d\tau} + \omega \operatorname{grad} t = -Q_{\text{исп}} + Q_x + \operatorname{div}(a \operatorname{grad} t), \quad (3)$$

где div – дивергенция – линейный дифференциальный оператор на векторном поле, характеризующий поток данного поля через поверхность достаточно малой (в условиях конкретной задачи) окрестности каждой

внутренней точки области определения поля;

∇ – оператор Набла – векторный дифференциальный оператор, компоненты которого являются частными производными по координатам;

$\omega_{\text{исп}}$ – удельная скорость испарения топлива (для жидкого топлива);

ω_x – удельная скорость химической реакции;

$Q_{\text{исп}}$ – удельная скорость расхода теплоты;

Q_x – удельная скорость прохода теплоты.

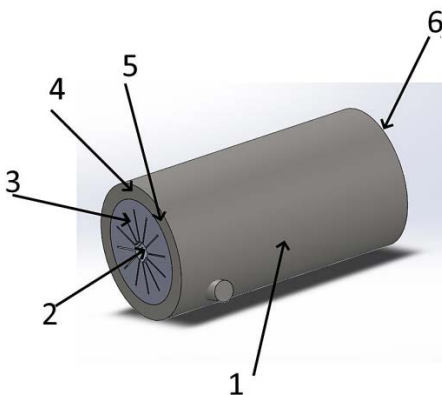
Общеизвестно, что горение жидкого топлива происходит в виде пара, поэтому в процессе испарения распыленного топлива образуются продукты пиролиза (пирогенетического разложения), а при химической реакции они исчезают, то есть выгорают. Из уравнения (2) видно, что при испарении тепло затрачивается, а при горении выделяется.

Чтобы определить параметры в камере сгорания потребуется решение вышеприведенных уравнений при соответствующих граничных условиях.

Но аналитическими методами решение этого вопроса представляется достаточно сложными, поэтому в данном случае более эффективным будет использование численных методов моделирования. Для этого был применен программный продукт ANSYS Fluent 13 [3,4].

В тепловой части моделирования рассматривается сжигание природного газа в камере сгорания газовой турбины, стабилизация в которой осуществляется за счет закрутки потока во входном регистре.

Изометрическая модель теплогенератора представлена на рис. 1.



1 – корпус; 2 – сопло для подачи газообразного топлива; 3 – лопаточный завихритель; 4 – камера сгорания; 5 – кольцевой канал; 6 – выходной участок

Рисунок 1 – Изометрический вид теплогенератора

Тепловой генератор работает следующим образом. Воздух поступает в камеру сгорания проходя через входной регистр, состоящий из 10 плоскостенных лопаток под углом 45° к оси. Топливо подается через центральное отверстие, находящееся на оси камеры сгорания. Процесс горения осуществляется в центральной части камеры сгорания, после чего поток газов поступает в область смешения.

Граничные условия для моделирования представим в виде таблицы 1.

Таблица 1. Граничные условия численного моделирования

№	Расход воздуха, кг/с	Расход топлива, кг/с	Количество элементов
1	10	0,5	200000
2	10	1,0	200000
3	10	1,5	200000

При моделировании использовалась модель турбулентности k -эпсилон, так как она позволяет адекватно моделировать процессы течения жидкостей при относительно низких затратах мощностей.

Далее представим результаты моделирования влияния изменения расхода топлива на процессы горения топлива и образования вредных компонентов. На рис. 2 показаны контуры температур газов в теплогенераторе при трех различных расходах топлива: 0,5 кг/с; 1 кг/с; 1,5 кг/с.

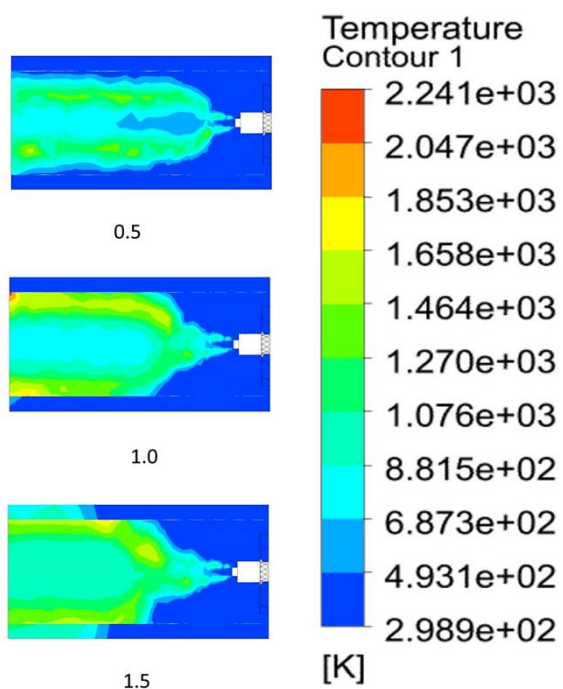


Рисунок 2 – Контур температуры при различных расходах топлива

Из рис. 2 видно, что увеличение расхода газа ведет к расширению факела в хвостовой части, причем, довольно заметно, что при расходе топлива 1 кг/с температура имеет максимальные значения. Этот факт объясняется тем, что такое отношение 1 кг топлива на 10 кг воздуха является стехиометрическим соотношением, и при таком соотношении достигаются максимальные температуры. Дальнейший рост расхода топлива приводит лишь к увеличению его недожога.

Как видно из рис. 3, максимальные скорости достигаются при максимальном расходе топлива (1,5 кг/с), истекающего из сопла.

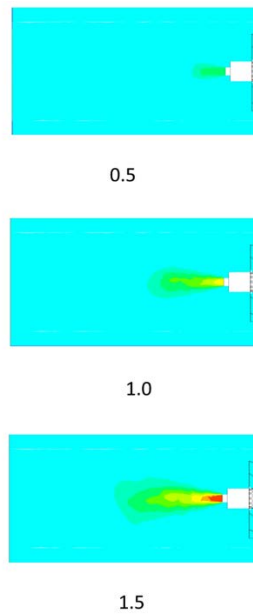


Рисунок 3 – Контуры скоростей при различных расходах топлива

Но учитывая значительные скорости истечения газа, не удалось просмотреть контуры скоростей воздуха, поэтому нужно пересмотреть расходы воздуха.

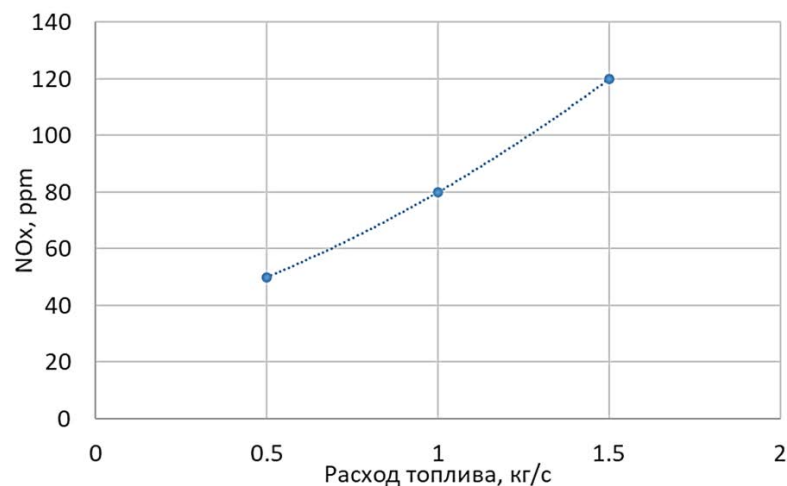


Рисунок 4 – Зависимость концентрации NO_x в уходящих газах на выходе от расхода топлива

Зависимость концентрации NO_x от расхода топлива в теплогенераторе показана на рис. 4. Очевидно, что увеличение расхода приводит к увеличению температуры газов в камере сгорания теплогенератора. Общеизвестно, что увеличение температуры приводит к экспоненциальному увеличению образования NO_x за счет диссоциации O₂ в составе воздуха.

В свою очередь на рис. 5 представлена зависимость температуры уходящих газов в зависимости от расхода топлива.

Глядя на график, можно отметить, что температура уходящих газов пропорционально зависит от расхода топлива в камере сгорания теплогенератора. Но существует область максимальных температур, которая

достигается при приближении значения коэффициента избытка воздуха к 1.

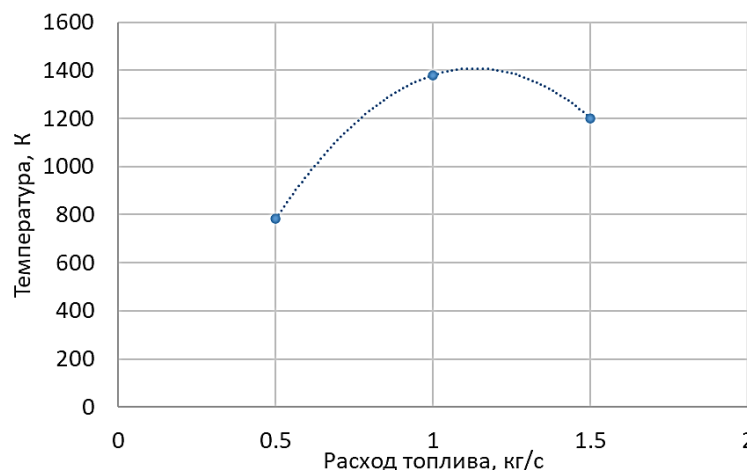


Рисунок 5 – Зависимость температуры газов на выходе от расхода топлива в теплогенераторе

В результате были установлены зависимости концентрации NO_x в уходящих газах и температуры газов на выходе от расхода топлива. Минимальная концентрация NO_x в уходящих газах наблюдается при расходе топлива 0,5 кг/с, в свою очередь максимальная температура газов на выходе – при расходе топлива 1,0 кг/с. Это позволит повысить энергоэффективность теплогенератора и снизит выбросы вредных веществ в окружающую среду. Результаты исследования в статье подтверждаются промышленными экспериментами.

Литература:

1. Глобальная энергетика и устойчивое развитие Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) / под ред. Бушуева В. В. (ИЭС), Мастепанова А. М. (МЦУЭР) – Москва : ИД Энергия, 201. – 360 с.
2. Патент № 1734 Республика Казахстан. Теплогенератор газовый с микрофакельной горелкой : № 2015/0527.2 : заявл. 29.12.2015 : опубл. 30.09.2016 / Умышев Д. Р., Достияров А. М., Кибарин А. А., Туманов М. Е. ; заявитель некоммерческое АО «Алматинский университет энергетики и связи». – 3 с.
3. Патент № 2161289 Российская Федерация, МПК F24H 3/02, F24J 3/00 (2006.01). Теплогенератор : № 2000115235/06 : заявл. 15.06.2000 : опубл. 27.12.2000 / Котельников В. П. ; заявитель Котельников В. П. – 4 с.
4. Jacobson, M. Z. Atmospheric Pollution / M. Z. Jacobson. – Cambridge University Press, 2002. – 216 p.
5. Патент на полезную модель № 225005 Российская Федерация. Комплексный воздухоподогреватель для автономного теплогенератора : № 2023126790 : заявл. 19.10.2023 : опубл. 11.04.2024 / Перепелица Н. С., Ежов В. С., Семичева Н. Е. ; заявитель некоммерческое ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». – 8 с.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦВЕТА ПОКРЫТИЯ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Билиджан М.Г., Безбородов Д.Л.
Донецкий национальный технический университет

Одним из факторов, влияющих на интенсивность передачи тепла через стенку отопительного прибора к воздуху в помещении, является покрытие прибора.

Традиционно радиаторы отопления окрашивают в белый цвет, что в основном обусловлено эстетическими соображениями. Однако известно, что тёмные поверхности, в частности чёрные, сильнее нагреваются под воздействием теплового излучения, что создаёт предпосылки для предположения о потенциально более интенсивной теплоотдаче в активной фазе работы отопительного прибора.

Вместе с тем остаётся недостаточно изученным вопрос теплоотдачи в процессе остывания. Как ведут себя покрытия разных цветов после снижения температуры источника тепла? Сохраняют ли чёрные поверхности своё преимущество по теплоотдаче, или динамика меняется? И насколько цвет покрытия значим в реальных условиях?

Эти вопросы требуют детального рассмотрения, поскольку могут повлиять на рекомендации по выбору покрытий для отопительных приборов с точки зрения энергоэффективности.

Цель: исследовать влияние цвета покрытия излучающей поверхности на плотность теплового потока.

Задачей экспериментов было проследить за динамикой остывания воды в алюминиевых трубках (длина трубок - 0,5 метра, внутренний диаметр 21 мм) с различными покрытиями.

Было проведено две серии экспериментов (по 6 опытов в каждой) в различных условиях: с изоляцией и без изоляции трубок.

В качестве покрытия использовались: акриловая краска чёрного и белого цветов; бесцветный лак; изолента чёрного, белого и красного цветов (толщина изоленты - 150 мкм). Термопары были размещены в середине трубок. С помощью логгера Testo 176 T4 регистрировались измерения температур с интервалом в 10 с.

По результатам измерений строились графики остывания воды в трубках. Были произведены следующие расчёты:

1) Расчёт количества теплоты, потерянного водой в ходе эксперимента

$$Q = cm (t_1 - t_2), \quad (1)$$

где Q - количество теплоты, Дж;

c - удельная теплоёмкость воздуха при температуре,

m - масса воды в трубке, кг,

t_1 - температура в трубке в начале эксперимента, °C,

t_2 - температура в трубке в конце эксперимента, °C.

2) Расчёт теплового потока (мощности) P , Вт

$$P = \frac{Q}{\tau}, \quad (2)$$

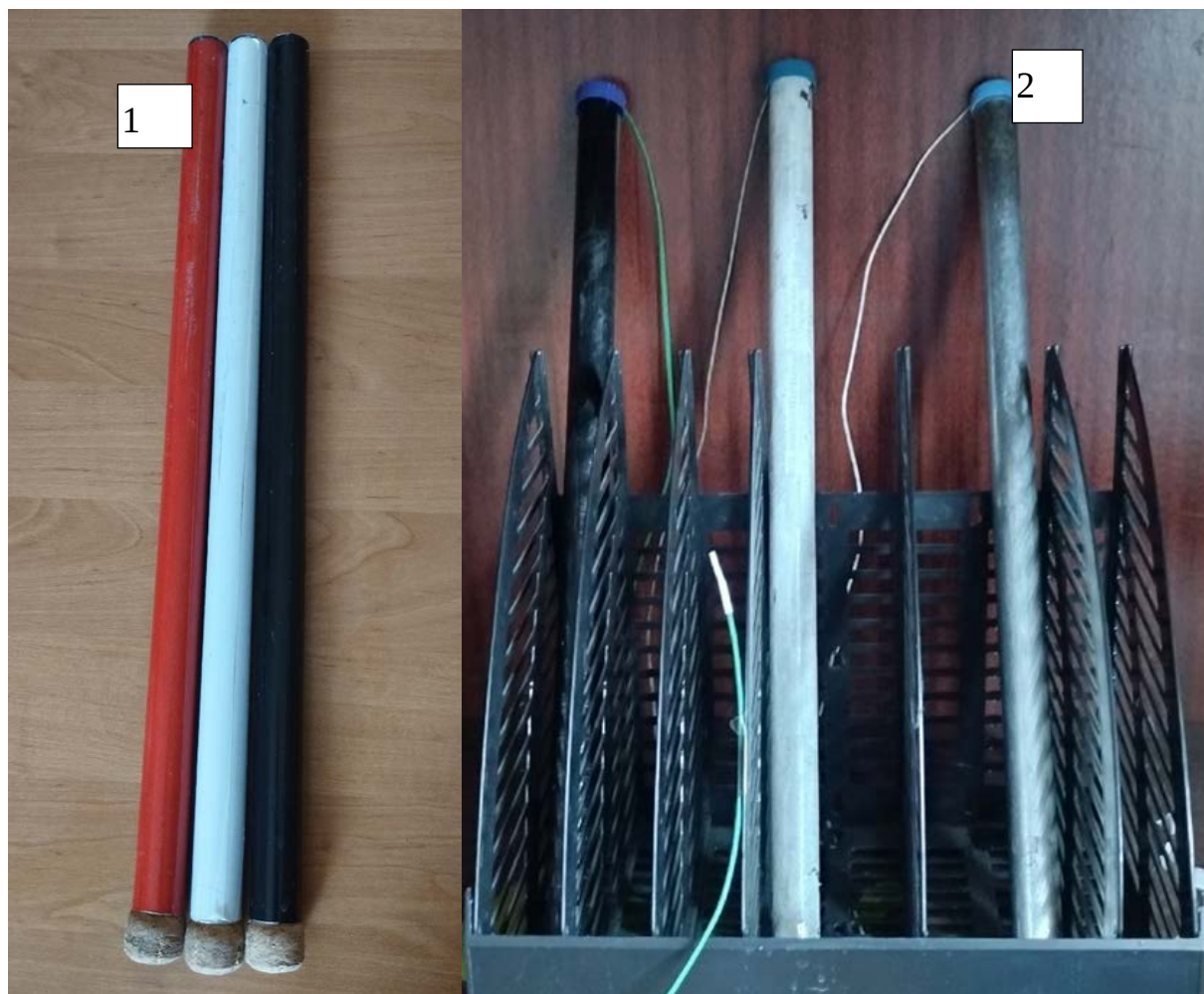
где Q - количество теплоты, Дж;

τ - время остывания воды, с.

3) Расчёт плотности теплового потока q , Вт/м²

$$q = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

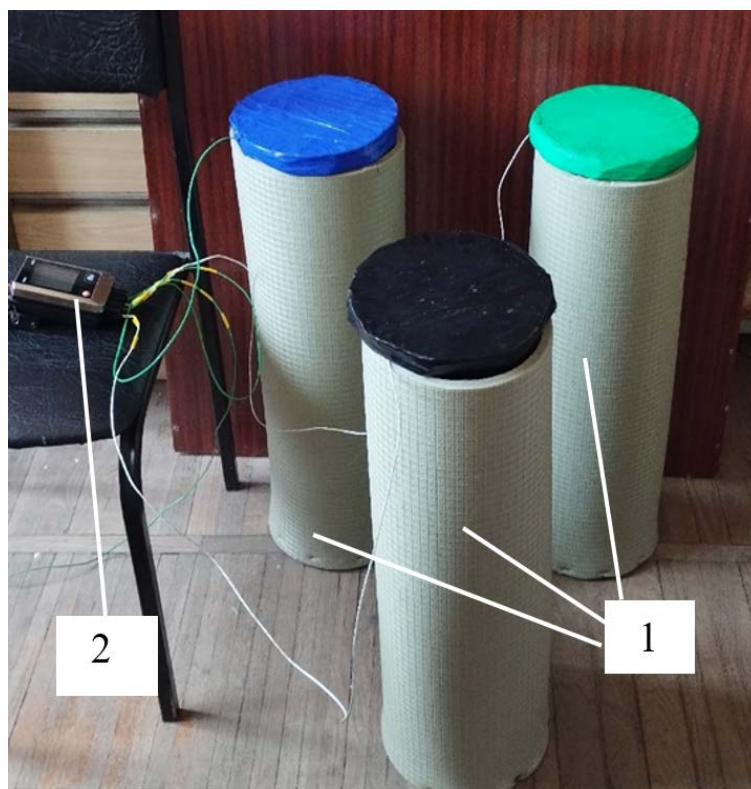
где S - площадь трубки, м².



1 – трубки с изоляцией в качестве покрытия;

2 – лабораторная установка 1 (без изоляции)

Рисунок 1 – Трубки с различными покрытиями, лабораторная установка 1



1 – «Испытательные камеры» с трубками; 2 – измерительный прибор (регистратор данных Testo 176 T4)
Рисунок 2 – Лабораторная установка 2

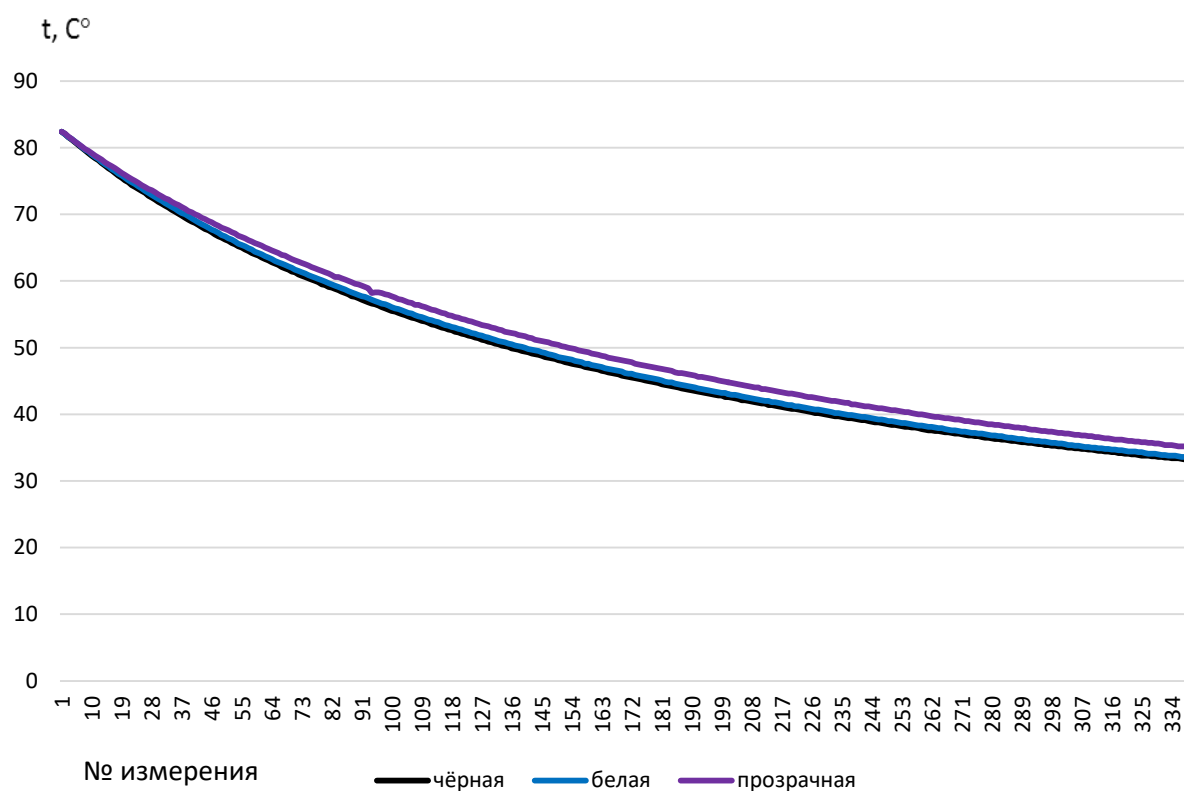


Рисунок 3 – График остывания воды в трубках

Таблица 1 – Результаты расчётов

Кол-во теплоты	Количество теплоты Q, Дж (за время τ)			Тепловой поток (мощность) P, Вт			Плотность теплового потока, Вт/м ²		
	чёрная	белая	прозрачная	чёрная	белая	прозрачная	чёрная	Белая	прозрачная
1	33750,09	33464,07	32534,52	9,985	9,901	9,626	147,736	146,483	142,414
2	36967,79	36610,27	35680,71	10,326	10,226	9,967	152,779	151,302	147,460
3	38111,86	37825,84	36324,25	11,111	11,028	10,590	164,396	163,162	156,685
4	37897,35	37611,33	36252,75	10,797	10,716	10,328	159,744	158,539	152,812
5	37754,34	37611,33	36252,75	10,204	10,165	9,798	150,969	150,398	144,965
6	35251,68	35037,17	33893,10	10,368	10,305	9,969	153,399	152,466	147,488
Среднее	36622,19	36360,00	35156,34	10,465	10,390	10,046	154,837	153,725	148,637

Выводы:

1) Плотность теплового потока q , Вт/м² при использовании чёрного покрытия в среднем превысила q при белом покрытии на 0,83%.

2) Окрашивание прозрачным лаком привело к падению q на 3,32% в сравнении с белой краской и на 4% в сравнении с чёрной.

3) Таким образом, наиболее интенсивная теплоотдача оказалась характерна для чёрных поверхностей, наименее интенсивная – для поверхности с прозрачным покрытием, однако разница между цветными поверхностями не достигает даже 1%.

4) Цвет покрытия поверхности отопительного прибора является второстепенным фактором, влияющим на плотность теплового потока.

Литература:

1. Сканапи, А.Н. Отопление / А.Н. Сканапи, Л.М. Махов. –Москва.: АСВ, 2008. – 86с.

2. Григорьев, Б. А. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев, Издательский дом МЭИ, 2011. – 20-21 с.

ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Демченко А.Е., Безбородов Д.Л., Зайцева П.А.
Донецкий национальный технический университет

1. Введение

Эффективное теплоснабжение – один из ключевых факторов устойчивой работы промышленного предприятия. Тепло используется для технологических процессов, отопления помещений, вентиляции, подогрева воды и поддержания комфортных условий для персонала.

От выбранной системы и источников теплоснабжения зависит не только себестоимость продукции, но и общая энергоэффективность производства, его экологичность и надежность.

В условиях роста цен на энергоресурсы и ужесточения требований к выбросам особенно актуализируется поиск оптимальных решений в сфере теплообеспечения.

2. Тепловые потребности промышленного предприятия

Для правильного выбора источников теплоснабжения нужно понимать характер и величину тепловых нагрузок.

На промышленном предприятии можно выделить несколько групп потребителей:

Производственные (технологические) нагрузки. Тепло требуется для технологических процессов: нагрев сырья, выпаривание, сушку, пастеризацию, плавление металлов, поддержание температурных режимов реакторов и т. д. Эти нагрузки часто нестандартны и могут меняться в зависимости от выпускаемой продукции.

Хозяйственно-бытовые и санитарные нагрузки. Сюда входит горячее водоснабжение для душевых, санузлов, умывальников, прачечных и других помещений, обеспечивающих санитарно-бытовые условия на производстве.

Отопление и вентиляция зданий. Необходимы для создания комфортного микроклимата в рабочих и административных помещениях, складах, цехах; включают поддержание температуры, компенсацию теплопотерь, отопление приточного воздуха.

Прочие потребители. Это подогрев воздуха для технологических и вентиляционных установок, подогрев наружных площадок, теплиц, а также подвод тепла к вспомогательным установкам (например, к тепловым сетям для партнеров).

Каждая группа имеет собственный график потребления, и при расчете системы важно учитывать суточные, недельные и сезонные колебания.

3. Основные подходы к теплоснабжению. Выделяют два базовых подхода к обеспечению предприятий теплом:

Централизованное теплоснабжение – предприятие получает тепло от внешнего источника, например, городской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) или

районной котельной по магистральным теплотрассам.

Автономное (децентрализованное) теплоснабжение – предприятие производит тепло непосредственно на своей территории, используя собственные котлы, генераторы, тепловые насосы и т. д.

Часто применяется смешанная схема, когда часть тепла поступает централизованно, а часть производится на месте. Такой подход повышает надежность и гибкость энергоснабжения.

4. Центральные источники тепла. Централизованные источники предоставляют тепло многим потребителям одновременно.

Основные варианты:

4.1. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). ТЭЦ – крупные энергетические объекты, которые одновременно вырабатывают электрическую и тепловую энергию. Преимущества: высокий коэффициент использования топлива (задействуется как тепло, так и электроэнергия); возможность покрывать большие тепловые нагрузки; устойчивость и резервирование.

Недостатки: зависимость от магистральных сетей, потери при транспортировке, необходимость платежей за подключение и передачу.

4.2. Районные и городские котельные. Районные котельные обслуживают отдельные зоны. Они проще по конструкции и дешевле ТЭЦ, но не дают электрической энергии и обычно работают с меньшим КПД. Важным фактором является доступность топлива (газ, мазут, уголь, биомасса).

4.3. Крупные промышленные котельные.

Иногда предприятия объединяют усилия и создают котельную, поставляющую тепло в пределах индустриального парка. Это повышает эффективность, но требует координации и договоров.

5. Автономные источники теплоснабжения.

Автономное тепло обеспечивает большую самостоятельность и гибкость. Основные типы:

5.1. Собственные котельные установки. Газовые котлы – наиболее распространенный вариант. Обеспечивают высокую эффективность, простой контроль и автоматизацию. Основное ограничение – доступ к газовым сетям.

Котлы на жидком топливе (мазут, дизель) – применяются при отсутствии газа. Обладают более высокими эксплуатационными расходами и требуют систем хранения топлива.

Твердотопливные котлы (уголь, пеллеты, щепа) – актуальны в регионах с доступным сырьем. Важны системы складирования и подачи топлива, а также соответствие экологическим нормам.

Электродкотлы – используются там, где электроэнергия относительно дешева или есть собственная генерация. Особенность – высокие эксплуатационные затраты и большие нагрузки на электросети.

5.2. Паровые и водогрейные котлы.

Выбор типа котла зависит от нужного температурного уровня. Паровые котлы применяются, если нужен насыщенный или перегретый пар для технологических процессов. Водогрейные котлы подходят для отопления и

ГВС.

5.3. Тепловые насосы.

Тепловые насосы используют низкопотенциальное тепло из грунта, воздуха, водоемов. При относительно высокой цене оборудования они обеспечивают хороший КПД (коэффициент преобразования) и низкие выбросы. Особенно эффективны на предприятиях с умеренными температурными требованиями и стабильной нагрузкой.

5.4. Когенерационные установки

Когенерация – совместное производство тепла и электроэнергии на месте. Она позволяет эффективно использовать топливо (газовые турбины, поршневые двигатели, микротурбины). Подходит для предприятий с постоянным потреблением электро- и тепловой энергии.

5.5. Использование вторичных энергоресурсов (ВИР).

Многие производства выделяют большое количество отходящего тепла: горячие газы, пар, теплая вода. Установки рекуперации (теплообменники, регенераторы, утилизационные котлы) позволяют использовать эту энергию повторно.

Примеры: утилизация тепла дымовых газов; использование конденсата; применение тепла компрессоров и холодильных машин.

5.6. Возобновляемые источники

В промышленных целях применяются солнечные коллекторы, геотермальная энергия, биомасса. Как правило, это вспомогательные решения, комбинируемые с другими источниками.

6. Критерии выбора источников теплоснабжения.

При выборе системы учитываются:

Тепловая нагрузка – средняя и пиковая потребность. Это влияет на мощность оборудования и схемы резервирования.

Температурный график – какие температуры теплоносителя нужны (низкотемпературные системы отопления или высокотемпературный пар).

Надежность – важность непрерывного теплоснабжения. Часто предусматривают резервные линии или дублирующие котлы.

Стоимость топлива и энергии – прямые эксплуатационные затраты.

Капиталовложения – стоимость строительства/модернизации котельной, котла, инженерных сетей.

Экологические требования – нормативы по выбросам, возможность установки очистных систем.

Локальные условия – наличие топлива, климатические особенности, участок под оборудование.

Гибкость – возможность адаптировать систему при изменении производственных процессов.

ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ И ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ И ИХ РОЛЬ В МЕРОПРИЯТИЯХ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Гомонова К.В., Салмаш И.Н., Зайцева П.А.
Донецкий национальный технический университет

В условиях глобальных изменений климата и стремительного роста потребления энергетических ресурсов вопрос энергосбережения становится все более актуальным. Одними из наиболее эффективных технологий, способствующих снижению потребления энергии и повышению ее эффективности, являются тепловые насосы и тепловые трубы.

Эти устройства играют важную роль в обеспечении устойчивого и экологически чистого энергоснабжения.

1. Тепловые насосы

1) Определение и принцип работы:

Тепловые насосы — это устройства, которые используют низкопотенциальное тепло из окружающей среды (воздуха, земли или воды) и преобразуют его в более высокопотенциальное для отопления или горячего водоснабжения.

Работая по принципу термодинамического цикла, тепловые насосы переносят тепло с помощью специального рабочего вещества (хладагента), которое изменяет свое агрегатное состояние.

Основная формула, описывающая эффективность теплового насоса, — это коэффициент производительности (COP):

$$\text{COP} = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

где:

(Q) — количество тепла, переданного в систему (кВт),

(W) — количество электрической энергии, затраченной на работу насоса (кВт).

Существует несколько видов тепловых насосов:

- Воздушные — используют тепло из окружающего воздуха.
- Геотермальные — извлекают тепло из земли.
- Водяные — используют тепло из водоемов.

2) Преимущества тепловых насосов:

Тепловые насосы обладают рядом значительных преимуществ:

- Энергоэффективность: они могут производить до 4-5 кВт тепла на каждый кВт затраченной электроэнергии, что делает их экономически выгодными.

- Экологичность: использование возобновляемых источников энергии снижает выбросы углерода и уменьшает негативное влияние на окружающую среду.

- Многофункциональность: тепловые насосы могут использоваться как для отопления, так и для охлаждения, что делает их универсальными.

2. Тепловые трубы

1) Определение и принцип работы:

Тепловые трубы представляют собой устройства, которые используют фазовый переход рабочего тела для передачи тепла. Они содержат герметичный контейнер, заполненный рабочей жидкостью. При нагреве эта жидкость испаряется и поднимается к холодной части, где конденсируется, возвращаясь в жидкое состояние. Такой механизм позволяет эффективно передавать тепло на большие расстояния.

Основная формула для расчета тепловой мощности, передаваемой через тепловую трубу, может быть представлена следующим образом:

$$Q = \frac{(k \times A \times \Delta T)}{L} \quad (2)$$

где:

- Q — тепловая мощность, передаваемая через тепловую трубу (Вт);
- k — эффективная теплопроводность рабочего вещества и конструкции тепловой трубы, Вт/(м·К);
- A — площадь поперечного сечения тепловой трубы, через которое передается тепло, м²;
- ΔT — разность температур между горячим (испарителем) и холодным (конденсатором) участками трубы, измеряемая в Кельвинах, К или градусах Цельсия, °С;
- L — эффективная длина тепловой трубы между точками нагрева и охлаждения, м.

2) Преимущества тепловых труб:

Преимущества тепловых труб заключаются в следующем:

- **Высокая теплопередача:** благодаря фазовому переходу тепловые трубы обеспечивают быструю и эффективную передачу тепла.
- **Компактность:** они занимают значительно меньше места по сравнению с традиционными системами отопления и охлаждения.
- **Надежность:** отсутствие движущихся частей делает их долговечными и минимизирует необходимость в обслуживании.

3) Роль в мероприятиях энергосбережения:

- **Повышение энергетической эффективности.**

Использование тепловых насосов и тепловых труб значительно повышает энергетическую эффективность зданий и промышленных объектов. Внедрение этих технологий позволяет сократить потребление энергии на отопление и охлаждение, что непосредственно влияет на снижение эксплуатационных расходов.

- **Снижение выбросов углерода.**

Тепловые насосы и тепловые трубы способствуют снижению выбросов углерода, так как они используют возобновляемые источники энергии и уменьшают зависимость от ископаемых видов топлива. Это делает их важным элементом в борьбе с глобальным потеплением.

- **Инновационные решения**

Современные технологии в области тепловых насосов и тепловых труб продолжают развиваться. Например, интеграция с солнечными панелями и интеллектуальные системы управления позволяют значительно повысить эффективность и устойчивость этих систем.

Такие инновации открывают новые горизонты для внедрения энергосберегающих технологий в повседневную жизнь.

Тепловые насосы и тепловые трубы играют ключевую роль в мероприятиях по энергосбережению. Их высокая эффективность, экологичность и многофункциональность делают эти технологии важными инструментами в обеспечении устойчивого энергоснабжения.

Инвестирование в их развитие и внедрение станет важным шагом на пути к более экологически чистому и экономически выгодному будущему. Улучшение технологий и их широкое применение могут значительно повлиять на снижение потребления энергии и сокращение негативного воздействия на окружающую среду.

Литература:

1. Баранов, И. В. Тепловые насосы: устройство и принцип работы. - М.: Энергия, 2019. — 256 с.
2. Петров, А. Л. Тепловые трубы: основы и применение. — СПб.: Наука, 2020. — 192 с.
3. Смирнов, В. И. Энергоэффективные технологии в отоплении и охлаждении. — Екатеринбург: УралГАУ, 2021. — 300 с.
4. Кузнецов, Н. А. Основы теплотехники и энергосбережения. - М.: Машиностроение, 2018. — 400 с.
5. Малышева, Т. В. Возобновляемые источники энергии и их применение в современных системах отопления. — Казань: Казанский университет, 2022. - 220 с.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПРИ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ШАХТНЫХ ВОД

Петрова С.С., Гридин С.В.

Донецкий национальный технический университет

В условиях глобального энергоперехода и дефицита углеводородного топлива, внедрение технологий утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) становится приоритетной задачей. Для промышленного региона Донбасса значительным неиспользуемым резервом является низкопотенциальное тепло шахтных вод, которые откачиваются на поверхность с температурой 20–35°C круглогодично. Прямое использование такой воды для отопления невозможно из-за низкой температуры, однако применение парокомпрессионных теплонасосных установок (ТНУ) позволяет трансформировать это тепло до уровня 60–75°C, пригодного для систем теплоснабжения. Ключевым этапом внедрения данной технологии выступает оценка термодинамической эффективности замещения традиционной газовой котельной теплонасосной станцией, использующей шахтную воду в качестве источника тепла.

Эффективность работы ТНУ оценивается коэффициентом преобразования (COP – Coefficient of Performance) μ , который показывает отношение полученной тепловой энергии к затраченной электрической работе компрессора [2].

Для идеального обратного цикла Карно коэффициент преобразования определяется температурами источника T_0 (шахтная вода) и потребителя T_k (сетевая вода):

$$\mu_{\text{Карно}} = \frac{T_k}{(T_k - T_0)}, \quad (1)$$

где температуры выражены в Кельвинах.

Реальный коэффициент преобразования μ учитывает необратимые потери в компрессоре, теплообменниках и дросселе, и рассчитывается через энтальпии хладагента в узловых точках цикла:

$$\mu = \frac{q_k}{l_k} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)}, \quad (2)$$

где: h_1 , h_2 – энтальпия паров хладагента на входе и выходе компрессора, кДж/кг;

h_3 – энтальпия жидкости перед дросселем, кДж/кг;

l_k – удельная работа сжатия, кДж/кг.

Также необходимо учитывать эксергетический КПД установки η_{ex} , который характеризует степень термодинамического совершенства системы [1]:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\mu}{\mu_{\text{Карно}}} \quad (3)$$

В работе произведен расчет цикла ТНУ на современном хладагенте R134a. При температуре шахтной воды $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (298 К) и требуемой температуре подачи $T_k = 65^\circ\text{C}$ (338 К) [4,5], теоретический предел эффективности составляет:

$$\mu_{\text{Карно}} = \frac{338}{(338 - 298)} = 8,45 \quad (4)$$

Фактический расчет с учетом свойств реального газа и КПД компрессора показывает значение $\mu \approx 3,8...4,2$ [6, 7]. Это означает, что затратив 1 кВт электрической мощности, мы получаем около 4 кВт тепловой энергии.

Сравнение традиционного и предлагаемого способов теплоснабжения приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Техничко-экономическое сравнение газовой котельной и ТНУ

Показатель	Газовая котельная (традиционный вариант)	Теплонасосная установка (предлагаемый вариант)
Источник энергии	Природный газ (исчерпаемый ресурс).	Электроэнергия + Тепло шахтной воды (возобновляемый ресурс).
Коэффициент использования	КПД $\eta \approx 0,92$ (всегда меньше 1).	COP $\mu \approx 4,0$ (всегда больше 1).
Экологический аспект	Выбросы NO_x , CO_2 в месте генерации.	Отсутствие выбросов в месте эксплуатации.
Зависимость от внешней среды	Зависит от цен на газ.	Стабильный источник тепла круглый год.

Для оценки реальной энергетической эффективности необходимо рассматривать полный цикл преобразования энергии: от сжигания топлива на электростанции до получения тепла потребителем. Критерием эффективности служит экономия первичного топлива (условного топлива) в масштабах энергосистемы.

Годовая экономия топлива ΔB определяется как разность расхода топлива в газовой котельной и расхода топлива на выработку электроэнергии для привода компрессора ТНУ:

$$\Delta B = Q_{\text{год}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{кот}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}}} - \frac{1}{\mu \cdot \eta_{\text{эс}} \cdot \eta_{\text{сети}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}}} \right), \quad (5)$$

где: $Q_{\text{год}}$ — годовая тепловая нагрузка, Гкал (или ГДж);

Q_{H}^{p} — низшая теплота сгорания натурального топлива на рабочую массу (для природного газа составляет порядка 8000 ккал/м³ или 33,5 МДж/м³);

$\eta_{\text{кот}}$ — КПД замещаемой котельной (0,90–0,92);

$\eta_{\text{эс}}$ — КПД тепловой электростанции (0,38–0,40);

$\eta_{\text{сети}}$ — КПД линий электропередач (0,90–0,95);

μ — коэффициент преобразования ТНУ.

Критическое значение коэффициента преобразования $\mu_{\text{кр}}$, при котором

тепловой насос становится энергетически выгоднее прямого сжигания газа, определяется условием $\Delta B > 0$:

$$\mu_{кр} = \frac{1}{\eta_{кот} \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{сети}} \quad (6)$$

Подставляя типовые значения, получаем:

$$\mu_{кр} = \frac{1}{0,92 \cdot 0,38 \cdot 0,92} \approx 3,1 \quad (7)$$

Поскольку расчетный коэффициент преобразования предлагаемой установки на шахтных водах составляет $\mu = 3,8...4,2$, что значительно превышает критическое значение 3,1, внедрение ТНУ обеспечивает реальное снижение потребления первичных энергоресурсов [4,6,7].

Проведенный термодинамический анализ подтверждает целесообразность утилизации низкопотенциального тепла шахтных вод [3], демонстрируя высокую степень термодинамического совершенства системы с эксергетическим КПД на уровне 45–50% [1]. Расчеты показывают, что внедрение теплонасосной установки обеспечивает положительный топливный баланс, позволяя экономить до 30–40 кг условного топлива на каждую гигакалорию выработанного тепла по сравнению с традиционными источниками. Данное сокращение потребления первичных энергоресурсов закономерно приводит к пропорциональному снижению валовых выбросов продуктов сгорания (CO_2 , NO_x), что способствует существенному улучшению экологической обстановки в промышленном регионе.

Литература:

1. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – Москва: Энергия, 1973. – 296 с.
2. Кравцов В.В. Об использовании тепловых насосов для покрытия нагрузок горячего водоснабжения и отопления / В.В. Кравцов, С.В. Гридин, А.С. Сафьянц, В.В. Карнаух // Оборудование и технологии пищевых производств. – 2012. - №29. – с.106-114.
3. Хейфец Л. М. Перспективы использования низкопотенциального тепла шахтных вод в системах теплоснабжения Донбасса / Л. М. Хейфец, А. С. Пимонов // Уголь Украины. – 2021. – № 5. – с. 40–44.
4. Danfoss Engineering: официальный сайт. – Нордборг, 2026. URL: <https://www.danfoss.com/en/> (дата обращения 29.01.2026).
5. GEA Heating & Refrigeration Technologies: официальный сайт. – Дюссельдорф, 2026. URL: <https://www.gea.com/en/products/heat-pumps/> (дата обращения 29.01.2026).
6. Oilon Group Oy: промышленные тепловые насосы. – Лахти, 2026. URL: <https://oilon.com/en/> (дата обращения 29.01.2026).
7. Viessmann Climate Solutions: официальный сайт. – Аллендорф, 2026. URL: <https://www.viessmann.family/en> (дата обращения 29.01.2026).

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Смоляков М.В., Гридин С.В., Боровская А.В.
Донецкий национальный технический университет

Теплообменники являются важными компонентами во многих отраслях, включая энергетику, где объектами промышленной тепловой изоляции являются паровые котлы, газоходы, паровые и газовые турбины, теплообменники, баки-аккумуляторы горячей воды, подогреватели, испарители, деаэраторы, баки, бойлеры, насосы, дымососы, газоходы, вентиляторы, сепараторы, циклоны, дымовые трубы и др. [1].

В промышленных тепловых агрегатах изолируются доменные, нагревательные, термические, стекловаренные, вращающиеся печи, электропечи, промышленные сушила, тоннельные и нагревательные печи, котлы-утилизаторы, подогреватели, воздухонагреватели, металлические, кирпичные и железобетонные дымовые трубы.

Кроме того, в промышленности тепловой изоляции подлежат вертикальные и горизонтальные технологические аппараты, насосы, теплообменники, резервуары для хранения воды, нефти и нефтепродуктов.

Несмотря на свою значимость, промышленные теплообменники имеют достаточно большие тепловые потери, что негативно сказывается на общей энергетической эффективности многих процессов [2]. Исходя из данных, полученных в ходе исследований, в России, фактические потери в таких системах составили до 244 млн. Гкал в год [2].

В значительной мере сверхнормативные потери тепла обусловлены неудовлетворительным техническим состоянием теплоизоляционных конструкций трубопроводов, теплообменного и теплоиспользующего оборудования. Поэтому правильно подобранное теплоизоляционное покрытие должно играть ключевую роль в конструкции теплообменников, что помогает свести потери тепловой энергии к минимуму и повысить общую энергоэффективность работы теплообменного оборудования [3]. Кроме того, при выборе качественных теплоизоляционных материалов можно значительно увеличить срок службы систем теплообменного оборудования.

Главной характеристикой теплоизоляционных материалов является теплопроводность – способность передавать теплоту. Теплопроводность зависит от плотности материала, количества и размера пор, влажности материала и многих других факторов.

По значению коэффициента теплопроводности λ , Вт/м·К, материалы подразделяют на классы:

1. А – низкий ($\lambda \leq 0,06$ Вт/м·К);
2. Б – средний (λ от 0,06 до 0,115 Вт/м·К);
3. В – повышенный (свыше 0,115 – 0,175 Вт/м·К).

По структуре твердой основы теплоизоляции её можно четко разделить на:

- ячеистые утеплители (твердые пены), в ячеистом (вспененом) утеплении могут использоваться как минеральные компоненты, так и органические полимеры,

- волокнистые утеплители (природным прототипом является дерево или хлопок), в них, как правило, используется твердая основа минерального происхождения (базальтовые горные породы, доменные шлаки или стекло).

Волокнистые теплоизоляционные материалы делятся на 2 вида: растительные и минеральные. Основным материалом нагревают, расплавляют и различными способами перерабатывают в тонкие волокна, из которых изготавливают и продают изделия в виде матов, плит, рулонов. Эти изделия применяют для тепловой, шумовой и звуковой защиты. Они эластичны, устойчивы к воздействию влажности и имеют очень низкую теплопроводность. Изделия из минеральной ваты не горючи, как правило, они плохо воспламеняемые.

Минеральные волокна перерабатывают в маты и плиты путем высокого наполнения вяжущими материалами, например фенольной смолой. Каменистую вату, известную под фирменным наименованием Rockwool, получают переплавкой остатков различных природных материалов, таких, как диабаз, известняк, доломит. В натуральном виде полуфабрикат из каменистой ваты имеет серо-коричневый оттенок, в случае же добавления искусственных синтетических вяжущих он приобретает желтоватый, темно-желтый (грязно-желтый), а иногда и коричневый цвет.

Стекловату получают из расплавленного кварцевого песка. Стекловата имеет светлый цвет, а при добавлении искусственных вяжущих материалов приобретает темно-серый оттенок.

Базальтовую вату получают из расплава вулканических базальтовых пород, она имеет темно-серый оттенок.

Шлаковата производится из жидкого шлака доменной печи, имеет серо-коричневый оттенок, гигроскопична и вследствие этого способна к комкованию. При непосредственном взаимодействии с металлическими деталями из-за содержания влаги вызывает коррозию, что может быть предотвращено соответствующей защитной окраской соприкасающейся поверхности.

К наиболее распространенным в настоящее время теплоизоляционным материалам, определяющим техническую возможность и экономическую эффективность реализации большинства технологических процессов, относятся [4]:

- волокнистые материалы (минеральная вата, базальтовое волокно, стекловолокно) в виде тонких волокон из расплавленного стекла, расплавленного известняка и мергеля, расплавленных доменных шлаков, войлока и плит на связующем из фенольной смолы, битуминизированных плит или плит с односторонним покрытием из алюминиевой фольги. Минераловатные маты прошивные безобкладочные или в обкладках из

металлической сетки или стеклоткани с одной или двух сторон и плиты теплоизоляционные минераловатные на синтетическом связующем имеют плотность 50–125 кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda=0,035\div0,058$ Вт/м·К, используются в утеплении аппаратов и теплообменников [1]. К примеру, минеральная вата и пеностекло при толщине 100–200 мм сокращают потери до <5 Вт/м² при температурном градиенте $\Delta T=100^\circ\text{C}$. Супертонкое стеклянное и базальтовое волокно с различными связующими и без них, обладающее высокой стойкостью к химическим веществам и слабой горючестью, также идеально подходит для промышленного оборудования;

- пенопласты и эластичные материалы: вспененный синтетический каучук ($\lambda=0,032\div0,042$ Вт/м·К) и полиэтилен ($\lambda=0,038\div0,042$ Вт/м·К), имеют хорошие теплоизоляционные свойства и могут применяться в виде эластичных листов и пластин при температурах от -70°C до $+150^\circ\text{C}$ преимущественно для изоляции оборудования с отрицательными температурами;

- пенополистирол ($\lambda=0,043\div0,064$ Вт/м·К, диапазон рабочих температур от -80°C до $+80^\circ\text{C}$) используют в виде вспученных блоков, плит или формованных плит, в виде вспененных частичек или экструдированной пены;

- формованные и высокотемпературные материалы (пеностекло в виде плит с закрытыми порами, $\lambda\leq0,066$ Вт/м·К), из-за своей высокой прочности и устойчивости к температурам (эффективный диапазон от -200°C до $+500^\circ\text{C}$) используется для изоляции резервуаров и ёмкостей различного назначения,

- силикат-кальциевые плиты, могут выдерживать до $+1000^\circ\text{C}$, широко применяются в циклонных теплообменниках и печах.

За последние годы было проведено множество экспериментальных исследований в сфере теплофизических свойств различных теплоизоляционных конструкций и решений по их устройству [2]. К примеру, в исследовании 2018–2020 г.г., посвященном теплоизоляционным плитам с льняными волокнами, проводились натурные испытания, продемонстрировавшие высокую эффективность таких плит, показав, что подобные материалы в значительной степени улучшают теплоизоляцию и снижают энергозатраты при работе теплообменного оборудования.

В том числе стоит обратить внимание на эксперименты с увлажненной изоляцией в теплоэнергетике [2, 3]. В ходе них были исследованы тепловые режимы теплопроводов при различной степени увлажнения. В результате выяснилось, что даже небольшие изменения в уровне влажности в значительной степени влияют на теплопроводность изоляции. В свою очередь это показывает важность контроля эксплуатации теплообменников.

Существует также и множество иных материалов, исследуемых на предмет их теплопроводности, например, жидкие теплоизоляционные покрытия (ЖТП). По результатам исследований примерный коэффициент теплопроводности для этих покрытий составил $\lambda=0,03\div0,05$ Вт/м·К и может достигать до 0,001 Вт/м·К при температуре эксплуатации от -47°C до $+260^\circ\text{C}$ [1].

Технические решения промышленной тепловой изоляции теплообменного

оборудования многообразны как по видам применяемых материалов, так и по конструкциям [2]. Так, для тепловой изоляции вертикальных и горизонтальных теплообменников и технологических аппаратов применяются конструкции на основе волокнистых теплоизоляционных материалов с применением приварных штырей или проволочного каркаса [1].

Для вертикальных теплообменников крепление теплоизоляционного слоя из минераловатных и стекловатных плит осуществляется с применением проволочного каркаса в виде колец, струн и стяжек, устанавливаемых по поверхности аппарата и теплоизоляционного слоя [1, 3].

Для горизонтальных теплообменников и др. малого и среднего диаметра преимущественно предусматривается крепление теплоизоляционного слоя на проволочном каркасе и комбинированное крепление теплоизоляционного слоя штырями с перевязкой по штырям струнами и стяжками [1].

Тепловая изоляция фланцевых соединений аппаратов выполняется съемной в виде полносборных конструкций, в которых теплоизоляционный слой жестко прикреплен к защитному покрытию. Конструкция оснащается замками или бандажами, могут быть применены теплоизоляционные матрасы с металлическим защитным кожухом.

Расчет и проектирование тепловой изоляции оборудования выполняется по инженерным методикам в соответствии с требованиями СНиП 2.04.14-88 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов».

Таким образом, теплоизоляция играет ключевую роль в энергетической эффективности промышленных теплообменников, их применение приводит к значительному снижению теплопотерь, повышению производительности систем теплоснабжения, что приведёт к снижению эксплуатационных затрат и повысит энергетическую безопасность предприятий.

Список литературы:

1. Шойхет, Б. М. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Современное состояние и перспективы развития. «Энергосбережение» №10, 2005. С.32-38.
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. Дрюк А.Г., Гридин С.В. Эффективность применения наружной и внутренней теплоизоляции ограждающих конструкций промышленности // Сборник докладов Всеукраинской научно-практической конференции студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» Донецк: ДонНТУ, 2011, с.140-143.
4. Панасенко Е.С., Гридин С.В. Теплоизоляция как способ рационального использования ресурсов // Сборник докладов Всеукраинской научно-практической конференции студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» Донецк: ДонНТУ, 2012. – С.139.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДА

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 делает задачу их снижения крайне важной.

Для анализа эффективности выбора или замены теплоизоляционных материалов применяются различные методы. Одним из наиболее распространенных является расчет годовых тепловых потерь с использованием формулы:

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T \cdot t, \quad (1)$$

где Q - годовые теплотери, 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:

$$E = Q_{\text{ст}} - Q_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ст}}$ и $Q_{\text{н}}$ — тепловые потери до и после замены теплоизоляции.

Рассмотрим технико-экономическое обоснование выбора материала теплоизоляции трубопровода для определения возможного снижения затрат на подачу тепла на конкретном примере. Предварительные расчеты показали, что тепловые потери трубопроводов тепловой сети одной из котельных города с использованием изоляции П-75 составят 20,83 кВт, Изошелл-Ц – 19,63 кВт, ППУ – 12,66 кВт, а тепловые потери оголенного трубопровода – 57,72 кВт.

Себестоимость тепла на квартальной котельной составляет 0,000583 руб./кДж. Рассмотрим ценовую категорию выбранных теплоизоляционных материалов и их срок эксплуатации.

Цена изоляции П-75 – 575 руб./м, сверху минеральной ваты требуется покрытие алюминиевой фольгой (65 руб./м). Срок эксплуатации в среднем составляет 5 лет, т.к. трубопровод расположен в непроходном канале, где

обычно имеет место высокая влажность, способствующая разрушению изоляции.

Цена изоляции Изошелл-Ц зависит от диаметра трубы: $d=108$ мм – 273руб./м, $d=133$ мм – 350 руб./м, $d=159$ мм – 400 руб./м. Срок эксплуатации: 10 лет.

Цена изоляции ППУ также зависит от диаметра трубы: $d=108$ мм – 1426 руб./м, $d=133$ мм – 1794 руб./м, $d=159$ мм – 2139 руб./м. Срок эксплуатации: 30 лет.

Рассчитаем капитальные затраты на замену изоляции для участков тепловой сети:

$$K_{рек} = S \cdot l, \quad (3)$$

где S – цена изоляции за 1 погонный метр длины, руб./м; l – длина участка трубопровода, м.

Результаты расчета капитальных затрат на замену различных видов изоляции представлены в таблице 1.

Определим фактическое время работы котельной по формуле:

$$T_{факт} = T_{кал} \cdot T_{см} \cdot K_{см}, \quad (4)$$

где $T_{кал}$ – календарное время работы котельной, $T_{кал}=183$ дней; $T_{см}$ – продолжительность смены, $T_{см}=12$ ч; $K_{см}$ – количество смен, $K_{см}=2$ шт., $T_{факт} = 183 \cdot 12 \cdot 2 = 4392$ ч.

Таблица 1 – Капитальные затраты на замену изоляции

№участка тепловой сети	Диаметр, $d_{тр}$, мм	Длина, l , м	Капитальные затраты, $K_{рек}$, руб.		
			П-75	Изошелл-Ц	ППУ
25	108	105	67200	28665	149730
26	159	128	81920	51200	273792
27	108	85	54400	23205	121210
121	159	8	5120	3200	17112
122	159	31	19840	12400	66309
123	159	34	21760	13600	72726
124	159	7	4480	2800	14973
125	133	54	34560	18900	96876
Всего $\Sigma K_{рек}$, руб.			289280	153970	812728

Тогда общие потери тепла в денежном эквиваленте при различных видах изоляции и при ее отсутствии составят:

$$E_{пот} = E_{час} \cdot T_{факт} \cdot Ц, \quad (5)$$

где $E_{час}$ – потери тепла за час, кДж/ч; $Ц$ – стоимость 1 кДж тепла, руб.

$$E_{пот}^{П-75} = 20,83 \cdot 3600 \cdot 4392 \cdot 0,000583 = 191930 \text{ руб./год};$$

$$E_{пот}^{Изошелл-Ц} = 19,63 \cdot 3600 \cdot 4392 \cdot 0,000583 = 180873 \text{ руб./год};$$

$$E_{\text{пот}}^{\text{ППУ}} = 12,66 \cdot 3600 \cdot 4392 \cdot 0,000583 = 116651 \text{ руб./год};$$

$$E_{\text{пот}}^{\text{оголен.}} = 57,72 \cdot 3600 \cdot 4392 \cdot 0,000583 = 531802 \text{ руб./год}.$$

Определим годовые капитальные затраты на различные виды изоляций:

$$K_{\text{рек}}^{\text{год}} = \frac{K_{\text{рек}}}{T_{\text{экс}}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{рек}}$ – капитальные затраты на замену изоляции, руб.; $T_{\text{экс}}$ – срок эксплуатации изоляции, лет.

$$K_{\text{рек}}^{\text{П-75}} = 289280 / 5 = 57856 \text{ руб./год};$$

$$K_{\text{рек}}^{\text{Изошелл-Ц}} = 153970 / 10 = 15397 \text{ руб./год};$$

$$K_{\text{рек}}^{\text{ППУ}} = 812728 / 30 = 27091 \text{ руб./год}.$$

Тогда наиболее оптимальным вариантом изоляции будет тот вариант, который дает наименьшую сумму потерь тепла в денежном эквиваленте и годовых капитальных затрат:

$$\Delta A_{\text{пот}} = E_{\text{пот}} + K_{\text{рек}}^{\text{год}}; \quad (7)$$

$$\Delta A_{\text{пот}}^{\text{П-75}} = 191930 + 57856 = 249786 \text{ руб./год};$$

$$\Delta A_{\text{пот}}^{\text{Изошелл-Ц}} = 180873 + 15397 = 196270 \text{ руб./год};$$

$$\Delta A_{\text{пот}}^{\text{ППУ}} = 116651 + 27091 = 143742 \text{ руб./год}.$$

Таким образом, наиболее оптимальным вариантом изоляции будет ППУ, исходя выше представленным расчетам. Теперь определим общую экономию сравнивая потери оголенного трубопровода и выбранного варианта изоляции по формуле:

$$ЕК = E_{\text{пот}}^{\text{огол.}} - E_{\text{пот}}; \quad (8)$$

$$ЕК^{\text{ППУ}} = 531839 - 116651 = 415188 \text{ руб./год}.$$

Далее определим срок окупаемости изоляции ППУ по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Sigma \hat{E}_{\text{рек}}^{\text{год}}}{ЕК}, \quad (9)$$

$$T_{\text{ок}}^{\text{ППУ}} = \frac{812728}{415188} = 1,96 \text{ года}.$$

Годовой эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = ЕК - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{рек}}^{\text{год}}, \quad (10)$$

где $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений, $E_{\text{н}}=0,15$,

$$\mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{ППУ}} = 415188 - 0,15 \cdot 812728 = 293279 \text{ руб./год}.$$

Произведем аналогичные расчеты и для других видов изоляции и сведем их в таблицу 2.

В результате экономического исследования определили годовые капитальные затраты на замену изоляции, рассчитали общие потери тепла при различных видах изоляции, срок окупаемости изоляции, а также годовой

эффект для предложенных мероприятий.

Таблица 2 – Результаты расчетов общей экономии ЕК, срока окупаемости $T_{ок}$, годового эффекта $\mathcal{E}_{год}$ для разных видов изоляции (с учетом фактических сроков эксплуатации)

Виды изоляции	ЕК, руб./год	$T_{ок}$, лет	$\mathcal{E}_{год}$, руб./год
П-75	339909	$289280/339909 \cdot 30/5=5,11$	$339909-0,15 \cdot 289280 \cdot 30/5 =$ $=79557$
Изошелл-Ц	350966	$153970/350966 \cdot 30/10=1,32$	$350966-0,15 \cdot 153970 \cdot 30/10=$ $=281679$
ППУ	415188	$812728/415188 \cdot 30/30=1,96$	293279

Таким образом, наибольшие годовые капитальные затраты с изоляцией П-75 составили 57856 руб./год. Наименьшая сумма потерь тепла в денежном эквиваленте и годовых капитальных затрат – 143742 руб./год у трубопровода с изоляцией ППУ, а это означает, что данная изоляция является наиболее оптимальным вариантом для трубопровода из рассмотренных видов изоляций.

Общая экономия от нанесения теплоизоляции ППУ составит 415188руб./год, срок окупаемости – 1,96 года (23,5 месяца), годового эффект – 293279 руб./год.

Таким образом, исследование эффективности замены теплоизоляционных материалов и конструкций для снижения тепловых потерь в тепловых сетях и технико-экономическое обоснование этого мероприятия является важной задачей на современном этапе развития энергетических технологий [1 - 3]. Её решение 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. Калмыков И.Л., Гридин С.В. Исследование эффективности замены теплоизоляционных материалов для снижения тепловых потерь в тепловых сетях // Металлургия XXI столетия глазами молодых. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сб. материалов. Донецк, ДонНТУ, 2025. С. 148-151.

АНАЛИЗ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Крапивин А.С., Гридин С.В.
Донецкий национальный технический университет

Проблема гидравлических потерь давления (напора) и потерь тепловой энергии при транспорте теплоносителя в тепловых сетях (ТС) имеет сложный характер. Гидравлические потери представляют собой падение давления из-за трения теплоносителя о внутреннюю поверхность трубопроводов. Их величина зависит от состояния труб, их диаметра, длины теплотрассы и наличия различного рода сопротивлений (сужений, расширений, изгибов, типа арматуры и т.д.). Большую часть невосполнимых потерь при транспортировке теплоносителя в ТС составляют потери в местных сопротивлениях трубопроводов, приводящие к потерям давления (напора) и к снижению расходов у потребителей. С ростом гидравлических потерь возрастает расход электроэнергии, потребляемой насосами на перекачку теплоносителя.

На величину тепловых потерь 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 у потребителей [1, 2].

Таким образом, износ оборудования, низкое качество теплоизоляции и внутренней поверхности трубопроводов, несовершенные схемы прокладки трубопроводов, в том числе наличие большого количества местных потерь полного давления - всё это ведет к значительным гидравлическим и тепловым потерям.

Местные потери полного давления усиливают обмен количеством движения между частицами движущейся жидкости (т.е. трение), повышая диссипацию энергии. К местным потерям давления относятся также потери динамического давления при утечках теплоносителя из сети.

Ряд расходомерных устройств, таких как диафрагма (расходомерная шайба), диффузор и конфузор (плавные расширения и сужения), труба Вентури (конфузорно-диффузорный переход), являются интенсивными местными сопротивлениями, влияющими на рост местных потерь полного давления. Способы снижения этих и других местных сопротивлений рассмотрены подробно в фундаментальном труде Идельчика И.Е. [3]. В некоторых случаях при установке расходомерных устройств для их эффективной работы необходимо создать сужение теплопровода с целью обеспечения достаточной скорости теплоносителя. Следовательно, учет этих местных сопротивлений в гидравлических расчетах сетей является актуальной задачей, верное решение которой позволит снизить как гидравлические, так и тепловые потери в ТС.

В числе основных мероприятий по снижению потерь можно выделить

комплексную модернизацию ТС за счет правильного подбора диаметра труб: их увеличение при сохранении расчетного расхода позволяет значительно сократить гидравлические потери за счет уменьшения скорости теплоносителя. Так, повышение диаметра труб на 10–15% может привести к снижению гидравлических потерь на 30–40% [1, 2]. Использование современных изоляционных материалов, таких как ППУ, позволяет снизить тепловые потери трубопроводов до 2–5% от общего объема передаваемой энергии [4].

Внедрение систем мониторинга, с использованием датчиков температуры, давления и расхода, позволяет в режиме реального времени контролировать параметры работы системы, выявлять участки с повышенными тепловыми и гидравлическими потерями и оперативно устранять неисправности.

При этом особый интерес с точки зрения снижения гидравлических потерь вызывает выбор расходомерных и сужающих устройств различных типов, требующий проведения тщательного технико-экономического анализа.

Технические и экономические аспекты внедрения мероприятий по снижению потерь имеют очень большое значение. Снижение гидравлических потерь напрямую приводит к сокращению потребления электроэнергии насосами, а уменьшение тепловых потерь - к снижению расхода топлива на источниках тепла [1, 4]. В сумме эффект может достигать десятков процентов от общих эксплуатационных расходов предприятий тепловых сетей. При этом сроки окупаемости инвестиций в модернизацию сетей могут сильно варьироваться: от 3–4 лет при локальной модернизации до 7–10 лет при реализации масштабных инфраструктурных проектов [1].

Рассмотрим более подробно технико-экономический анализ выбора и установки расходомерного устройства. Изначально основное значение уделяется его стоимости, но цена прибора и затраты при его эксплуатации часто являются факторами противоречивыми. Например, диафрагма относительно дешевое устройство, но при её установке на трубопровод ТС неизбежны потери части тепла в результате гидравлического сопротивления потоку, которое, возможно, придется восполнять другими устройствами (например, электронагревательными приборами у потребителя). С другой стороны, ультразвуковой расходомер или труба Вентури имеют большую стоимость и не влекут за собой потерь расхода, но срок окупаемости их установки довольно большой.

Зная стоимость расходомерного устройства и количества переданной потребителю теплоты, можно ориентировочно оценить рентабельность его монтажа с точки зрения гидравлических потерь.

Например, требуется установить расходомерное устройство с сужением на трубопровод 219×7 с теплоносителем (горячая вода с температурой около 100°C). Имеем следующие исходные данные: ориентировочный (усредненный) расход $G_H = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ (или $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$); напор $H_H = 50 \text{ м}$; удельная теплоемкость воды (при 100°C) $c_B = 4,22 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$; ожидаемая разница температур между прямой и обратной сетевой водой, $t_H - t_C = +25^\circ\text{C}$; продолжительность отопительного периода (184 дня) $T = 4416 \text{ ч}$.

По ГОСТ 8.586.1 необходимое сужение составит 90,3 мм. Рассчитаем потери тепла в случае установки диафрагмы (средняя цена базовой комплектации – от 10 до 50 тыс. руб.).

Следует иметь в виду, что являясь простым и эффективным инструментом для измерения расхода, диафрагма имеет и свои отрицательные стороны, а именно, создает значимое сопротивление потоку.

Коэффициент сопротивления диафрагмы определим согласно [3]:

$$\zeta = \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 \left[\left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right) + 0,707 \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0,375} \right]^2. \quad (1)$$

Формула справедлива для тонких диафрагм с острыми краями при $l/D_T = 0 \div 0,015$, где l – длина диафрагмы, $D_T = 4F_0/\Pi_0$, F_0 – площадь сечения на входе, Π_0 – периметр, а также при $Re > 10^5$. Из формулы (1) видно, что коэффициент сопротивления диафрагмы быстро растёт с ростом отношения F_1/F_0 .

Гидравлическую характеристику трубопроводов ТС (потери напора) с обычными скоростями движения сред (для $Re > 2 \cdot 10^5$) можно оценить следующей формулой:

$$H = \frac{w^2}{2g} \left(\frac{L}{d} \lambda + \sum \zeta_m \right), \quad (2)$$

где H – потери напора, м; w – скорость среды, м/с; L – развернутая длина трубопровода, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; d – расчетный диаметр трубопровода, м; λ – коэффициент сопротивления трения; $\sum \zeta_m$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений. Если учесть зависимость $w = 4G/\pi d^2$, где G – расход, м³/с, то (2) можно представить в виде:

$$H = \frac{8G^2}{\pi^2 d^4 g} \left(\frac{L}{d} \lambda + \sum \zeta_m \right) = hG^2, \quad (3)$$

При установке расходомерного устройства, имеющего дополнительное местное сопротивление ξ_{m1} , зависимость (3) примет вид:

$$H = (h + h_1)G^2, \quad h_1 = \frac{8}{\pi^2 d^4 g} \zeta_{m1}. \quad (4)$$

Пусть гидравлическая система «насос–трубопровод» до установки диафрагмы работает в номинальном режиме (или близком к нему). Тогда:

$$H_n = hG_n^2, \quad h = H_n/G_n^2, \quad (5)$$

где H_n – номинальный напор (по расходной характеристике насоса), м; G_n – номинальный расход (по расходной характеристике насоса), м³/с.

Если предположить, что после установки диафрагмы с дополнительным сопротивлением ξ_{m1} система «насос–трубопровод» сохранит работоспособность ($H \approx H_n$), то из (4), используя (5), можно определить новый расход G_1 ($G_1 < G_n$):

$$G_1 = \sqrt{\frac{H_n G_n^2}{H_n + G_n^2 h_1}}. \quad (6)$$

По разности расходов $\Delta G = G_H - G_1$ можно определить потери теплоты ΔQ :

$$\Delta Q = \Delta G c_B (t_H - t_C) T, \quad (7)$$

где c_B - удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/кг К; t_H - температура прямой сетевой воды, °С; t_C - температура обратной сетевой воды, °С; T - продолжительность отопительного периода; ΔQ - количество теплоты, кДж.

По формуле (1) безразмерный коэффициент сопротивления диафрагмы $\xi_{M1} = 56,468$, по формуле (5) коэффициент $h_1 = 2642 \text{ с}^2/\text{м}^5$. Новый расход $G_1 = 0,027 \text{ м}^3/\text{с}$ ($98,022 \text{ м}^3/\text{ч}$), согласно формулы (6), ожидаемое снижение расхода составит $\Delta G = G_H - G_1 = 1,978 \text{ м}^3/\text{ч}$.

По формуле (7) определим потери тепла после установки диафрагмы за отопительный период $T = 4416 \text{ ч}$: $\Delta Q = 921,526 \text{ ГДж}$ ($220,102 \text{ Гкал}$). При стоимости $1929,97 \text{ руб./Гкал}$ потери за весь отопительный период в денежном выражении составят $424,380 \text{ тыс.руб.}$

Рассчитаем потери тепла при установке более дорогого расходомерного устройства современного типа - вихреакустического преобразователя расхода МЕТРАН-300ПР-А-100 (средняя цена - от 45 до 70 тыс.руб.), выбрав его типоразмер в каталоге по номинальному расходу ($100 \text{ м}^3/\text{ч}$), на который необходимо выполнить сужение Ду100 мм. Производитель гарантирует потери давления не более $\Delta H = 0,03 \text{ МПа}$ (примерно 3 м напора водяного столба).

Необходимые потери расхода определим из пропорции:

$$\frac{G_1^2}{G_H^2} = \frac{H_H - \Delta H}{H_H}, \quad (8)$$

где ΔH - потери давления, $\Delta H = 3 \text{ м. вод. столба}$.

Из (8) легко определить новый расход: $G_1 = \sqrt{\frac{H_H - \Delta H}{H_H}} G_H$.

Отсюда $G_1 = 96,954 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\Delta G = G_H - G_1 = 3,046 \text{ м}^3/\text{ч}$.

По формуле (7) определим потери тепла за отопительный период: $\Delta Q = 1419 \text{ ГДж}$ (339 Гкал), то есть при установке МЕТРАНа тепловые потери более существенные. При стоимости $1929,97 \text{ руб./Гкал}$ потери в денежном выражении за весь отопительный период составят $654,260 \text{ тыс.руб.}$

В случае установки трубы Вентури (конфузорно-диффузорный переход) для инженерных расчетов коэффициент сопротивления диффузора ξ_d определяется согласно [3] по формуле:

$$\xi_d = \frac{\Delta P}{\rho w_0^2 / 2} = \varphi_{\text{расш}} \left(1 - \frac{1}{n_{n1}} \right)^2. \quad (9)$$

где $n_{n1} = F_1 / F_0$ - степень расширения диффузора, F_0 - площадь начального сечения на входе в конфузор, м^2 , F_1 - площадь сечения после расширения, м^2 .

При равномерном профиле скорости во входном сечении и $Re > 2 \cdot 10^5$ потери на расширение выражаются через коэффициент полноты удара $\varphi_{\text{расш}}$ (отношение потерь на расширение в диффузорах к теоретическим потерям на удар при внезапном расширении сечения). Для конических диффузоров с

углами расширения $0^\circ < \alpha \leq 40^\circ$ он определяется по формуле Идельчика И.Е. [3]:

$$\varphi_{\text{расш}} = 3,2 \operatorname{tg}^{1,25}(\alpha/2). \quad (10)$$

Общий коэффициент сопротивления конфузоров ξ_k удобно представить в виде [3]:

$$\xi_k = \frac{\Delta P}{\rho w_0^2 / 2} = \xi_m + \xi_{\text{тр}}, \quad (11)$$

где $\xi_m = (-0,0125n_0^4 + 0,0224n_0^3 - 0,00723n_0^2 + 0,00444n_0 - 0,00745) \cdot (\alpha_p^3 - 2\pi\alpha_p^2 - 10\alpha_p)$ - коэффициент местного сопротивления конфузора; $n_0 = F_0/F_1$ - степень сужения конфузора; $\alpha_p = 0,0174\alpha$ рад, (α - в градусах); $\xi_{\text{тр}}$ - коэффициент сопротивления

трения сужающегося участка, $\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8\sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n_{n0}}\right)^2$, коэффициент гидравлического трения λ принимается постоянным, но зависящим от Re и относительной шероховатости стенок трубопровода Δ/d .

Таким образом, при установке трубы Вентури с углами сужения (расширения) 12° имеем суммарный коэффициент сопротивления (формулы (9)–(11)) менее 0,328 и ожидаемое снижение расхода 0,012 т/ч. Потери теплоты составят 5,591 ГДж (1,335 Гкал), что в денежном выражении за весь отопительный период составит 2,577 тыс. руб.. Очевидно, что большая стоимость трубы Вентури Ду100 мм (от 35 до 100 тыс.руб.) быстро окупится.

Разработка мероприятий по снижению гидравлических и тепловых потерь в ТС является важной частью стратегии устойчивого развития систем теплоснабжения, она требует комплексного подхода, сочетающего технические, экономические и управленческие решения, что позволит значительно повысить эффективность теплоснабжения, снизить нагрузку на окружающую среду и обеспечить энергетическую безопасность страны.

Литература:

1. 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.
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. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
4. Крапивин, А. С., Гридин, С. В. Разработка мероприятий по снижению гидравлических и тепловых потерь в тепловых сетях / А.С. Крапивин, С.В. Гридин // Металлургия XXI столетия глазами молодых : сб. материалов II Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов, г. Донецк, 28 мая 2025 г. – Донецк : ДонНТУ, 2025. – С. 156-159.

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЛА КВГ-6.5: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ЗАМЕНЫ ГОРЕЛОК И КСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА

Легенькая С.В., Лебедев А.Н.

Донецкий национальный технический университет

Энергетическая эффективность и надежность водогрейных котлов, таких как КВГ-6.5, являются критически важными факторами для экономической стабильности и экологической безопасности предприятий тепловой энергетики. По мере эксплуатации и морального старения оборудования возникает насущная потребность в его модернизации, направленной на снижение расходов топлива, повышение КПД и обеспечение соответствия современным нормам безопасности. Рассмотрим комплексный подход к модернизации, включающий два ключевых направления: замену устаревших горелок на современные промышленные аналоги и оснащение котла комбинированной системой утилизации тепла, сочетающей экономайзер и воздухоподогреватель [4]. Подобные мероприятия не только решают задачи энергосбережения, но и способствуют продлению срока службы оборудования, что особенно актуально в современных экономических условиях.

Технико-экономическое обоснование модернизации котла КВГ-6.5.

Исходные показатели котла КВГ-6.5, особенно при работе с физически и морально устаревшими горелочными устройствами, часто не соответствуют современным стандартам эффективности и экологичности. Основными аргументами в пользу проведения модернизации являются:

- Снижение расхода топлива. Современные горелки обеспечивают более полное сгорание газового топлива, а система утилизации тепла позволяет использовать энергию уходящих газов, что в совокупности приводит к значительной экономии топливных ресурсов.

- Повышение коэффициента полезного действия (КПД) агрегата. Установка экономайзера и воздухоподогревателя позволяет возвращать в тепловой процесс энергию, которая ранее безвозвратно терялась с дымовыми газами, что напрямую повышает общий КПД котельной установки.

- Сокращение вредных выбросов. Оптимизация процесса горения, обеспечиваемая новыми горелками, приводит к снижению концентрации оксидов азота (NO_x) и угарного газа (CO) в продуктах сгорания, что улучшает экологические показатели и облегчает соблюдение природоохранного законодательства.

- Увеличение срока службы котла. Снижение тепловых потерь и оптимизация температурных режимов работы элементов котла положительно сказываются на их ресурсе, отдалая момент необходимости капитального ремонта или полной замены агрегата.

•Повышение надежности и безопасности работы. Новое оборудование, как правило, оснащается APS-системами контроля и управления, что минимизирует риск аварийных ситуаций и повышает общую культуру эксплуатации.

Замена устаревших горелок является первым и фундаментальным шагом в процессе модернизации котла КВГ-6.5. Этот этап определяет эффективность всего последующего комплекса мероприятий. В настоящее время рекомендуется замена существующих подовых горелок на горелки МПИГ-3, которые имеют значительно более высокие показатели [2].

К основным преимуществам горелки МДГГ относят:

- Интенсивное устойчивое горение газозооушной смеси с коротким факелом при колебаниях давления газа в газопроводе;
- Отсутствует перегрев экранов и амбразур;
- Теплоотдача от микродиффузионного факела на 20% выше, чем о диффузионного;
- Снижение температуры уходящих газов на 30–60°C;
- Высокая равномерность температурного поля в топке;
- Достигается коэффициент избытка воздуха в горелке равный 1,02–1,15;
- Снижение экологических показателей: уровень эмиссии CO < 50 мг/м³ и NO_x < 90 мг/м³;
- Снижение расхода газа на 3,5–10%.

Следующим стратегическим шагом является утилизация тепловой энергии уходящих дымовых газов. Даже после оптимизации горелочного устройства температура газов на выходе из котла остается значительной. Комбинированная система, включающая экономайзер и воздухоподогреватель, позволяет последовательно и максимально эффективно использовать этот потенциал.

Совместная работа экономайзера и воздухоподогревателя создает синергетический эффект, приводящий к значительному росту экономичности всей котельной установки. Комбинированная система экономайзера и воздухоподогревателя позволяет повторно использовать тепловую энергию, которая обычно теряется вместе с уходящими газами.

Проектирование такой системы требует точного теплового и аэродинамического расчетов для обеспечения оптимального баланса между эффективностью теплообмена и сопротивлением газового и воздушного трактов.

В котельном агрегате экономайзер устанавливается первым по ходу газа, а воздухоподогреватель — вторым. Это позволяет более глубоко охладить продукты горения, так как температура холодного воздуха ниже температуры питательной воды на входе в экономайзер.

Конденсационный утилизатор поверхностного типа использует критериальные уравнения для описания процесса теплообмена при глубоком охлаждении газов, таких как уравнение, полученное профессором А.А. Кудиновым. В основе расчета лежит определение коэффициента теплоотдачи с

использованием критериальных чисел (Reynolds, Prandtl и др.).

Критериальные уравнения Кудинова А.А. для расчета теплоотдачи в конденсационных утилизаторах представлены в виде зависимости критерия Нуссельта (Nu) от критериев Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr) и дополнительных факторов, учитывающих условия теплообмена. В общем виде уравнение теплоотдачи имеет вид [1]:

$$Nu = K_0 \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \varepsilon$$

где Nu — критерий Нуссельта, безразмерный коэффициент теплоотдачи,

Re — критерий Рейнольдса (скорость потока, длина и кинематическая вязкость),

Pr — критерий Прандтля (относительная диффузия тепла и импульса),

K_0 , m , n — эмпирические коэффициенты и показатели степеней, зависящие от режима течения (ламинарный, переходный, турбулентный) и условий эксперимента.

Эти уравнения применяются для расчета коэффициента теплоотдачи в конденсационных утилизаторах и позволяют при известных гидродинамических условиях и физических свойствах газа оценить теплопередачу.

Что касается площади теплообменной поверхности утилизатора при температуре дыма перед трубой, для разных температур дыма: при температуре дыма около 105 °С площадь поверхности составляет порядка 180 м². Таким образом, примерные данные по конденсационному утилизатору включают использование критериального уравнения теплоотдачи по Кудинову и площадь теплообменной поверхности перед трубой около 170 м² при температуре дыма около 100 °С. Источник данных: публикации по методике расчета критериальных уравнений Кудинова и Симонова [1,3].

Сделаны все необходимые расчеты, результаты сведены в таблицу.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики котла до и после модернизации

Параметр	До модернизации	После модернизации (ожидаемый результат)
КПД котла, %	85%	Увеличение на 5-7%
Температура уходящих газов, °С	Высокая (176°С)	Снижение на 40-50°С
Расход топлива	160м³/ч	Снижение на 5-10%
Выбросы NO _x /CO	Соответствовали устаревшим нормам	Существенное снижение

Комплексная модернизация водогрейного котла КВГ-6.5, заключающаяся в замене устаревших горелок на современные модели и установке

комбинированной системы утилизации тепла на основе экономайзера и воздухоподогревателя, представляет собой высокоэффективную меру по повышению энергоэффективности котельных установок.

Данное техническое решение позволяет достичь значительной экономии топлива, повысить экологическую безопасность и надежность работы оборудования, а также обеспечить его соответствие актуальным нормативным требованиям.

Несмотря на необходимые капитальные вложения, такой проект обладает коротким сроком окупаемости за счет существенного снижения эксплуатационных расходов и является стратегически верным шагом в условиях растущих тарифов на энергоносители и ужесточения экологического законодательства.

Литература:

1. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
2. <https://zakupka.com/p/903416771-shchelevye-gorelki-mpig-3-k-vodogreynomu-kotlu-tvg-8m/>
3. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 139 с.
4. Исследование характеристик комбинированных устройств глубокого охлаждения дымовых газов на водогрейных котлах системы ЖКХ. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д., 2024. Вестник ИГЭУ, 2024, вып. 5, с. 31 – 41.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ЖКХ ПУТЁМ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ И ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

Каминский К.Д., Пацин А.Д., Лебедев А.Н.
Донецкий национальный технический университет

Одними из крупнейших потребителей природного газа являются котельные установки предприятий ЖКХ и промышленности. Даже при достаточно высоком КПД водогрейных котлов (90–93%) температура уходящих дымовых газов составляет 140–180°C, что соответствует потерям тепла до 8–12% от располагаемой мощности.

Существует два основных направления утилизации этого тепла:

1. Глубокое охлаждение дымовых газов ниже температуры точки росы с конденсацией водяных паров, что позволяет использовать скрытую теплоту парообразования для нагрева сетевой воды. Этот подход реализуется в комбинированных теплоутилизаторах (воздухоподогреватель плюс конденсационный экономайзер). С экономической точки зрения на паровых котлах решение задачи может быть достигнуто увеличением площади поверхности воздухоподогревателя с охлаждением дымовых газов до более низких температур (но выше точки росы) без установки дополнительного экономайзера.

2. Выработка электроэнергии из низкопотенциального тепла с помощью органического цикла Ренкина (ORC), который эффективен при температурах теплоносителя 100–200°C, где классический пароводяной цикл неработоспособен.

Цель работы – на основе ранее разработанных методик [3,4] оценить эффективность обоих подходов для различных типов котлов (ТВГ-8М, ПТВМ-100, БКЗ-75).

1. Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания

Ключевым параметром при проектировании систем глубокого охлаждения является температура точки росы t_p . Для продуктов сгорания природного газа она зависит от состава топлива, влагосодержания воздуха, коэффициента избытка воздуха α и давления.

В работе [3] предложена уточнённая методика, основанная на уравнении, связывающем влагосодержание d (г/кг сухих газов) с парциальным давлением водяного пара p_{H_2O} :

$$d = 0,608 p_{H_2O} / (P_{\text{общ}} - p_{H_2O}) \quad (1)$$

Коэффициент 0,608 учитывает состав продуктов сгорания природного газа (отличие от 0,622 для воздуха). Алгоритм расчёта включает: расчёт горения, определение состава влажных и сухих продуктов сгорания, расчёт d , определение давления насыщения p_s и температуры насыщения по таблицам или уравнению Антуана.

Для условий работы котлов на природном газе t_p обычно составляет 55–57°C (при $\alpha = 1,2–1,3$). При увеличении α до 1,5 t_p снижается до 54°C, а при уменьшении до 1,1 – возрастает до 60°C [3]. Это необходимо учитывать при выборе температуры газов на выходе из теплоутилизатора.

2. Комбинированная система глубокого охлаждения для котла ТВГ-8М.

В работе [4] предложена двухступенчатая схема утилизации для водогрейного котла ТВГ-8М (температура уходящих газов 183°C, расход топлива 0,193 м³/с, природный газ).

Первая ступень – воздухоподогреватель.

Дымовые газы охлаждаются со 183°C до 117°C, нагревая воздух на горение с 30°C до 125°C. Расчётные параметры:

- тепловой поток $Q = 247,89$ кВт;
- площадь поверхности из гладких труб $F = 125–143$ м²;
- при использовании игольчатых рекуператоров ($K \approx 130$ Вт/(м²·К)) площадь снижается до ≈ 26 м².

Вторая ступень – конденсационный экономайзер.

60% газов (1,61 м³/с) после воздухоподогревателя охлаждаются с 117°C до 40°C (ниже температуры точки росы, которая для данного режима составляет 54,9°C). Остальные 40% газов идут в байпас. Смешение потоков даёт температуру 70,8°C, что исключает конденсацию в дымовой трубе.

Результаты расчёта конденсационного экономайзера:

- теплопроизводительность $Q_{кт} = 459,6$ кВт;
- расход нагреваемой воды (с 10°C до 40°C) $G_v = 3,67$ кг/с;
- площадь поверхности теплообмена $F_{кт} = 161$ м².

Подогрев воздуха до 125°C даёт дополнительное тепло $Q_{в-х} = 1686,0$ кДж/м³ топлива, что составляет около 4,5% от теплоты сгорания газа и приводит к прямой экономии природного газа.

Вывод по разделу: комбинированный теплоутилизатор позволяет повысить КПД котельной на 4–5% за счёт утилизации скрытой теплоты конденсации и подогрева воздуха. Однако он не вырабатывает электроэнергию.

3. Применение органического цикла Ренкина (ORC) для выработки электроэнергии

Альтернативным или дополняющим подходом является использование органического цикла Ренкина, который позволяет преобразовывать низкопотенциальное тепло (100–200°C) в электрическую энергию.

В качестве рабочих тел рассматриваются R245fa (негорюч, безопасен, GWP=1030) и изобутан R600a (экологичен, GWP=3, но горюч).

Расчёт для котла ПТВМ-100 (водогрейный, 100 Гкал/ч).

Исходные данные: расход газов ≈ 55 кг/с, $t_{вх} = 150^\circ\text{C}$, $t_{вых} = 65^\circ\text{C}$.

Располагаемая тепловая мощность $Q = 5,05$ МВт.

При отборе 40% тепла: $Q_{ORC} = 2020$ кВт.

При параметрах цикла $T_{исп} = 100^\circ\text{C}$, $T_{конд} = 40^\circ\text{C}$.

Реальный КПД ORC $\eta = 10,9\%$.

Электрическая мощность $P_{эл} = 220$ кВт. С учётом потерь принято 180 кВт.

Расчёт для котла БКЗ-75 (паровой, 75 т/ч).

Исходные данные: расход газов ≈ 40 кг/с, $t_{\text{вх}}=140^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вых}}=65^{\circ}\text{C}$.

Располагаемая тепловая мощность $Q = 3,24$ МВт.

При отборе 50% тепла: $Q_{\text{ORC}}=1620$ кВт, $P_{\text{эл}}= 176$ кВт. Принимаем 150–180 кВт.

Экономическая оценка (для 180 кВт):

- Выработка при 4000 ч/год: 720 000 кВт·ч, экономия 4,32 млн руб./год (при тарифе 6 руб./кВт·ч).

- $\text{CAPEX} \approx 25$ млн руб., $\text{OPEX} = 0,2$ млн руб./год.

- Срок окупаемости: $25 / (4,32 - 0,2) = 6,07$ года.

- При 7000 ч/год (промышленный режим) срок сокращается до 3,4 года.

Дополнительное преимущество ORC: теплота конденсации (около 80% от подведённой) может быть использована для подогрева сетевой воды – режим когенерации.

Таблица 1 - Сравнение двух подходов и рекомендации

Параметр	Конденсационный экономайзер (ТВГ-8М)	ORC (ПТБМ-100 / БКЗ-75)
Продукт	Тепловая энергия (нагрев воды)	Электрическая энергия
Мощность (полезная)	459,6 кВт (тепло)	150–180 кВт (эл.)
Экономия топлива	4,5%	косвенная (замещение покупной электроэнергии)
Срок окупаемости	2–4 года	3,5–6 лет
сложность внедрения	средняя (врезка в газопровод)	высокая (турбина, генератор, автоматика)

Рекомендации:

- Для котельных, где есть потребность в дополнительном тепле (сетевая вода, подогрев питательной воды), целесообразен конденсационный экономайзер.

- Для котельных с круглогодичной работой и высокими тарифами на электроэнергию целесообразна установка ORC (особенно в промышленных котельных и на ТЭС).

- Наиболее эффективна комбинированная схема: сначала конденсационный экономайзер (утилизация скрытой теплоты, нагрев воды), затем ORC на остаточном тепле (выработка электроэнергии).

Выводы

1. Разработанная методика расчёта температуры точки росы [3] позволяет обоснованно выбирать температурные режимы работы систем глубокого охлаждения.

2. Комбинированный теплоутилизатор для котла ТВГ-8М (воздухоподогреватель + конденсационный экономайзер) обеспечивает экономию топлива около 4,5% и имеет простую конструкцию, доступную для внедрения.

3. ORC-установки мощностью 150–180 кВт на котлах ПТВМ-100 и БКЗ-75 позволяют вырабатывать электроэнергию из ранее теряемого тепла, окупаясь за 3,5–6 лет в зависимости от режима работы.

4. Оба направления энергосбережения целесообразны и дополняют друг друга. Наиболее эффективна комбинированная схема: конденсационный экономайзер + ORC на остаточном тепле.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию рабочих тел для ORC применительно к конкретным котлам и на разработку отечественного турбинного оборудования малой мощности.

Литература:

1. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.

2. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.

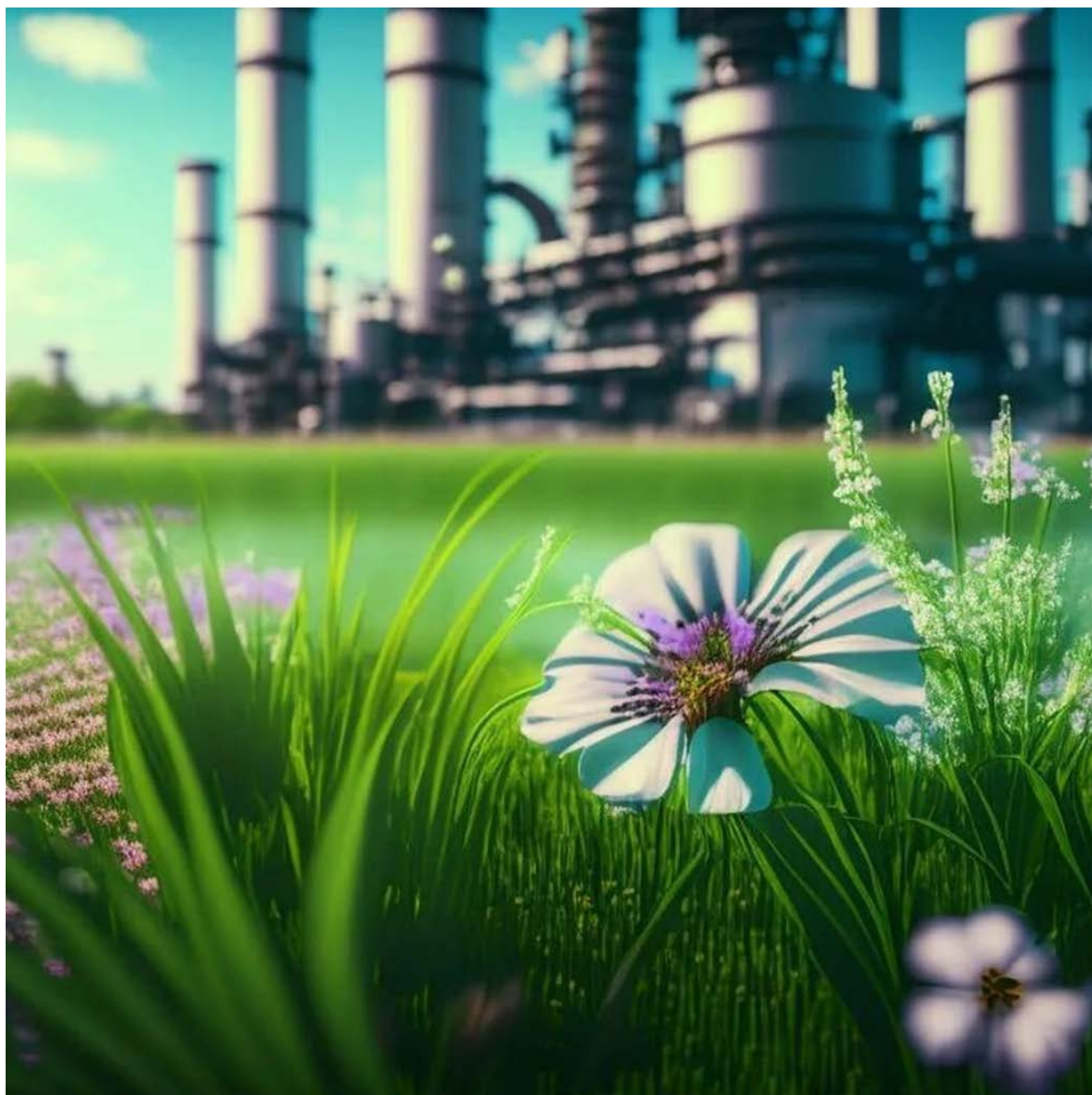
3. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания природного газа // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып.6. – С.43–49.

4. Мильман О.О., Перов В.Б. Теплоутилизационные установки на базе органического цикла Ренкина. – М.: ПАО «Мосэнерго», 2024. – 40 с.

5. Овсянник А.В., Ключинский В.П. Выбор, расчёт и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина // Энергетика. – 2022. – Т.65. – №1. – С.76–88.

6. Шубенко А.Л. и др. Экономическая эффективность утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – №6(76). – С.18–26.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ



РОЛЬ ЛОКАЛЬНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ, ПОДВЕРГШИХСЯ ИНТЕНСИВНОМУ ТЕХНОГЕННУМУ И БОЕВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Асламов В.Н., Асламова Я.Ю., Полухина С.В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина),
Донецкий национальный технический университет

Процесс восстановления территорий, пострадавших в ходе боевых действий, представляет комплексную задачу, выходящую за рамки строительно-монтажных работ [1, 2]. Интенсивное техногенное воздействие (разрушение промышленных объектов, повреждение почвенного покрова, уничтожение лесного массива и изменение ландшафта) коренным образом изменяет экологический профиль региона.

В таких условиях важным фактором становится оперативный мониторинг состояния атмосферы и подстилающей поверхности. Стандартные метеорологические данные, получаемые от удалённых государственных станций, часто оказываются недостаточно точными для решения локальных задач реабилитации территорий. Установление сети автономных метеорологических станций непосредственно в зонах проведения восстановительных работ позволяет минимизировать экологические риски, связанные с вторичным загрязнением атмосферы мелкодисперсной пылью, оптимизировать процессы рекультивации земель и обеспечить безопасность инженерных работ.

Даная статья посвящена анализу роли локального метеомониторинга как элемента системы экологической безопасности при восстановлении нарушенных территорий. На рис. 1 приведена блок-схема интеграции метеоданных в цикл восстановления территорий.

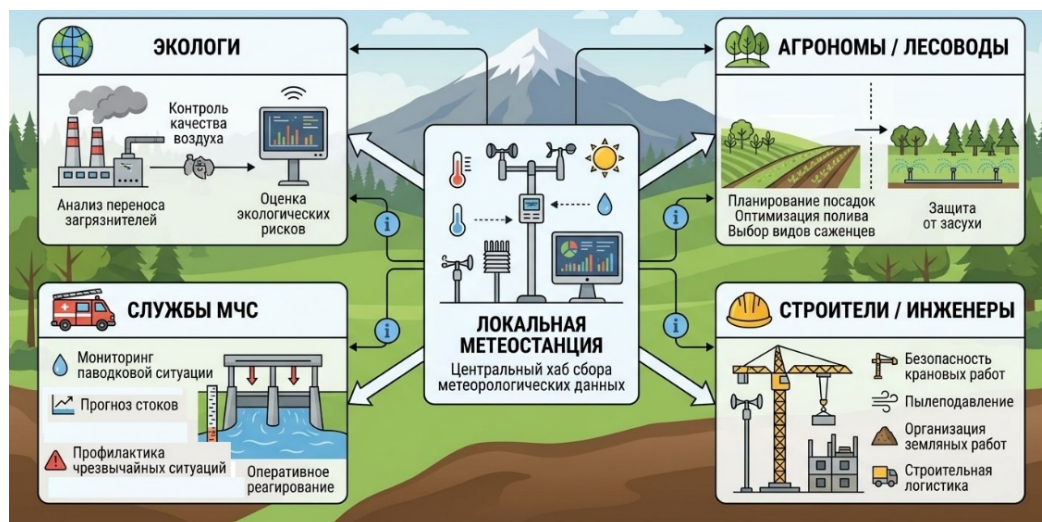


Рисунок 1 - Блок-схема интеграции метеоданных в цикл восстановления территорий

Боевые действия оставляют после себя разрушенные здания, повреждённые промышленные объекты, отвалы. При демонтаже завалов или рекультивации земель образуется огромное количество пыли (в том числе токсичной – асбест, тяжёлые металлы, продукты сгорания). Без точных данных о приземном ветре, инверсиях, турбулентности невозможно рассчитать параметры зон распространения загрязняющих веществ. Данные станции позволяют прогнозировать, как будет распространяться пылевое облако и вовремя скорректировать выполняемые работы.

Почвы на нарушенных территориях часто имеют измененную структуру и химический состав (загрязнение горюче-смазочными материалами, продуктами детонации). Для успешного высаживания лесополос и восстановления сельскохозяйственных угодий нужны точные данные о температурах, влажности почвы, количеству осадков именно на восстанавливаемом участке. Глобальные прогнозы часто ошибаются, а локальная станция позволяет получить более точные данные.

Многие ирригационные системы, дамбы и естественные русла рек могут быть повреждены. Мониторинг осадков в режиме реального времени необходим для предотвращения локальных паводков. На нарушенных ландшафтах сток воды изменён, а отсутствие растительности увеличивает смыв плодородного слоя почв. Станции позволяют вовремя объявлять штормовые предупреждения при угрозе размыва дамб или затопления низин.

Процесс очистки территорий от взрывоопасных предметов также зависит от погодных условий. Скорость и направление ветра влияют на работу дронов-разведчиков. Температурные колебания и влажность почвы меняют глубину залегания мин и чувствительность датчиков. Наличие метеоданных позволяет планировать графики работы сапёрных групп с максимальной эффективностью и безопасностью.

При восстановлении промышленных предприятий важно заново построить систему экологического контроля. Новые проекты ПДВ требуют актуальных климатических данных. Старые справочники могут быть не актуальны – после пожаров и взрывов ландшафт и, возможно, климат, изменились. Локальные станции дают юридически значимые данные для проектирования новых очистных сооружений.

Боевые действия приводят к специфическим повреждениям почв: образование артиллерийских воронок, уплотнение тяжёлой техникой, загрязнение тяжёлыми металлами и продуктами детонации. В таких условиях традиционные циклы самовосстановления природы нарушены. Для успешной рекультивации (посадки лесов, восстановления пашен) нужны сверхточные данные, так как почва теряет влагу и прогревается иначе, чем в обычных условиях [3]. Кроме того, в воронках и траншеях создаётся микроклимат, отличный от данных центральной метеослужбы.

При рекультивации нарушенных территорий важно учитывать следующие метеорологические параметры: температура воздуха и почвы; количество и режим осадков; влажность воздуха; скорость и направление ветра; испарение и

эвапотранспирация; световой режим; температурные экстремумы и заморозки.

В условиях освобождённых территорий Донецкой Народной Республики рациональным является применение автономных малогабаритных метеостанций (АМС). Они должны быть мобильными, работать на солнечных батареях, передавать данные по GSM, так как инфраструктура в зонах восстановления часто разрушена.

С их помощью можно решить следующие задачи.

Во-первых, оптимизация фиторемедиации. Так, например, определить идеальное время высадки растений-абсорбентов, которые «вытягивают» химические загрязнения из почвы, проблематично без точных данных о заморозках или засухе на конкретном участке, а не в целом по району, молодые посадки погибнут. На рис. 2 приведена схема интеграции АМС в технологическую цепочку рекультивации с целью минимизации влияния климатических рисков. В отличие от традиционных методов, где работы ведутся по календарному графику, предлагаемый подход опирается на фактические показатели гидротермического коэффициента, что важно для формирования устойчивых экосистем в техногенных ландшафтах.



Рисунок 2 – Схема интеграции АМС в технологическую цепочку рекультивации

Во-вторых, мониторинг миграции загрязнений. Осадки и ветер способствуют распространению токсичных веществ из воронок. Метеостанции помогают определить направление распространения вредных веществ, например, после ливня, и оценить риск их попадания в грунтовые воды.

В-третьих, прогнозирование пожарной опасности. Нарушенные экосистемы (высохшие лесополосы, завалы древесины) воспламеняются и горят быстрее, чем леса, находящиеся в обычном состоянии. Метеостанция подаёт сигнал о критически низкой влажности.

АМС – это современные комплексы, которые существенно превосходят классические методы метеорологических наблюдений по ряду параметров. Их ключевые преимущества:

1. Непрерывность и высокая частота измерений. АМС фиксируют данные 24/7 с любой заданной периодичностью.
2. Минимизация влияния человеческого фактора.

3. Оперативность передачи данных. Информация поступает в режиме реального времени через интернет, радиосвязь или другие каналы, что позволяет быстро реагировать на изменения погоды.

4. Точность и стандартизация. Датчики АМС регулярно проходят калибровку, а данные автоматически обрабатываются по единым алгоритмам, что обеспечивает высокую точность и сопоставимость результатов.

5. Возможность работы в труднодоступных и опасных районах.

6. Комплексность наблюдений. Одна станция может одновременно измерять десятки параметров, что сложно реализовать вручную.

7. Экономия ресурсов. Снижаются затраты на персонал, логистику, обучение и обслуживание наблюдательных пунктов.

8. Интеграция с цифровыми ресурсами. Данные легко интегрируются в геоинформационные системы, системы управления и прогнозирования, что повышает эффективность мониторинга и принятия решений.

АМС имеют практическое значение для рекультивации. Они обеспечивают быструю реакцию на неблагоприятные погодные условия, точное планирование агротехнических мероприятий, повышение эффективности восстановления нарушенных территорий за счет своевременных корректировок [4].

При размещении АМС на территориях, пострадавших в ходе боевых действий необходимо учитывать ряд требований для обеспечения сопоставимости и оперативности получаемых данных:

- станция должна размещаться так, чтобы измеряемые параметры отражали реальные условия восстанавливаемой территории, а не локальные аномалии;

- АМС нельзя размещать рядом с крупными строениями, дорогами, источниками тепла, пыли, дыма, взрывоопасными объектами;

- необходимо учитывать наличие минных полей, неразорвавшихся снарядов;

- должно быть обеспечено наличие устойчивой связи (GPRS, радиоканал, спутник) и источника питания (сеть, солнечные батареи, аккумуляторы);

- для крупных территорий размещение станций должно осуществляться по сетевому принципу для охвата всех ключевых участков;

- должна быть обеспечена возможность подъезда техники и специалистов для монтажа, ремонта, проверки.

Кроме того, в зонах с высоким риском (минные поля, активные разрушения) необходимо использовать дистанционные методы обследования (БПЛА) для выбора безопасных точек размещения АМС.

Для обеспечения бесперебойной работы АМС в условиях отсутствия инфраструктуры необходим комплексный подход, сочетающий такие аспекты:

1. Автономное энергоснабжение. С этой целью могут использоваться:

- солнечные панели или ветрогенераторы для выработки энергии;

- промышленные аккумуляторы (например, никель-кадмиевые), устойчивые к экстремальным температурам и длительным циклам без обслуживания;

- резервные источники питания (генераторы, дополнительные

аккумуляторные блоки);

- эффективные контроллеры и датчики с низким потреблением энергии.

2. Защита оборудования:

- грозозащита и заземление для предотвращения выхода из строя при ударе молнии;

- антивандальные и погодоустойчивые корпуса;

- регулярная поверка и обслуживание опорных конструкций, особенно после экстремальных погодных явлений.

3. Надёжная связь:

- использование спутниковой связи или радиомодемов для передачи данных в отсутствие проводных сетей;

- резервирование каналов передачи данных (например, основной GPRS, резервный – спутник).

4. Минимизация обслуживания:

- применение датчиков и аккумуляторов с длительным сроком службы и высокой надёжностью;

- дистанционный мониторинг состояния станции и автоматические уведомления о сбоях;

- возможность быстрой замены ключевых узлов без специалистов.

Для комплексного мониторинга восстановленных территорий необходим набор датчиков, охватывающих почвенные, метеорологические, гидрологические и геотехнические параметры. Это позволяет своевременно выявлять риски, корректировать агротехнические мероприятия и обеспечивать долгосрочную устойчивость рекультивированных земель.

Таким образом, метеорологическая станция на восстанавливаемой территории – это не просто прибор, это «глаза» экологов и инженеров. Создание сети локального мониторинга является необходимым условием перехода от ликвидации последствий к устойчивому развитию региона, пострадавшего в ходе боевых действий.

Литература:

1. Липски, С.А. Организационно-экономические и технологические подходы к восстановлению сельскохозяйственных земель, нарушенных в ходе военных действий: ключевые факторы деградации земель, опыт СССР, проблемы информационного и правового обеспечения / С.А. Липски // Международный агрокультурный журнал. - 2024. - № 6. - С. 1735-1751.

2. В ДНР оценили вред лесному хозяйству из-за действий ВСУ [Электронный ресурс] – Загл. с экрана – <https://regnum.ru/news/3824700> (дата обращения: 15.05.2026) – Режим доступа: свободный.

3. Назаренко, Е.Б. Способы рекультивации нарушенных в результате военных действий земель и их экономическая оценка / Е.Б. Назаренко, О.В. Гамсахурдия // Экономика и предпринимательство. – 2024. - № 2. - С. 662-665.

4. Родимцев, С. А. Использование автоматической метеостанции, при отсутствии GSM-соединения / С. А. Родимцев, Л. П. Еремин, Т. И. Гуляева // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2021. – № 1(34). – С. 71-82.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЭТАНИЗАЦИИ ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ

Бузановский И.С., Ошовский В.В.

Донецкий национальный технический университет

Ректификация является одним из распространённых процессов разделения жидких смесей в химической промышленности. Традиционные методы ручного расчёта ректификационных колонн: материальный и тепловой баланс, гидравлический расчёт колонны, расчёт теоретических тарелок методом Мак-Кэба-Тиле, требуют много времени и часто не обеспечивают достаточной точности для многокомпонентных систем.

Ректификация представляет собой процесс разделения жидких смесей, основанный на многократном испарении и конденсации компонентов с различными температурами кипения. Процесс осуществляется в противоточных колоннах тарельчатого или насадочного типа, где происходит интенсивный массо- и теплообмен между паровой и жидкой фазами.

В условиях современных задач проектирования объектов химической технологии широкое применение находят программные пакеты такие как ChemCAD, Aspen Hysys, DWSIM, PRO-II и т.п. Проведя предварительное тестирование полученных моделей в различных пакетах, наилучшие результаты были получены в программном комплексе Aspen Hysys.

Программные комплексы Aspen Hysys представляют собой ключевой инструмент для инженерного моделирования и расчёта при создании новых либо совершенствовании действующих технологических схем с целью повышения их технико-экономических показателей. Данные программы позволяют формировать цифровые модели процессов, анализировать результаты симуляции и принимать обоснованные проектные решения, обеспечивая интеграцию между этапами проектирования оперативного управления и стратегического планирования. Благодаря открытой архитектуре программного обеспечения, область разработанных моделей существенно расширяется: помимо инженерных расчётов, они могут быть адаптированы для систем автоматизированного управления производством и задач оптимизации. Все расчётные модули базируются на верифицированных физико-химических данных и многолетнем опыте промышленной эксплуатации, что гарантирует достоверность получаемых результатов и их соответствие реальным технологическим условиям.

В качестве примера рассмотрим моделирование и расчёт ректификационной колонны деэтанатора (рисунок 1).

Нагретая жидкость подаётся в колонну деэтанатора над 17-й тарелкой.

Деэтанатор – вертикальный аппарат колонного типа, укомплектованный 34 ситчатой тарелкой. Счёт тарелок ведётся сверху вниз.

В колонне происходит фракционирование, то есть разделение более лёгких

Давление верхнего продукта: 2448 кПа
 Давление в ребойлере: 2503 кПа
 Температура верхней части: -0.2 °С
 Температура нижней части: 85.57 °С

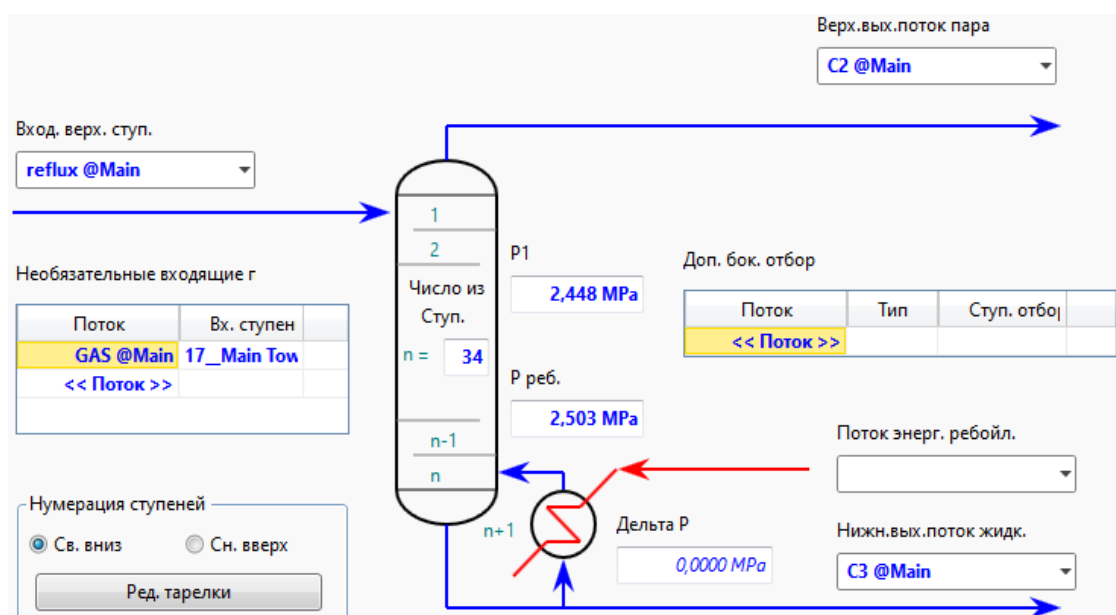


Рисунок 3 – Параметры колонны дезанизации.

Во вкладке монитор задаётся расход верхнего продукта равным 93680 т/ч, и колонна будет готова к расчёту. После того, как программа просчитала процесс, можно посмотреть состав продуктов C_2 и C_3 (рисунок 5).

	Мольные доли
Methane	0,0071
Ethane	0.8589
Propane	0.0258
i-Butane	0.0000
n-Butane	0.0000
i-Pentane	0.0000
n-Pentane	0.0000
n-Hexane	0.0000
CO2	0.1081

Рисунок 4 – Состав верхнего продукта C_2

Таким образом современные программные пакеты проектирования представляют собой мощные и гибкие инструменты для расчёта и оптимизации химико-технологических процессов, в том числе и процесса ректификации, позволяя перейти от упрощённых инженерных методов к строгому математическому моделированию.

	Мольные доли
Methane	0.0000
Ethane	0.0151
Propane	0.4919
i-Butane	0.0915
n-Butane	0.1098
i-Pentane	0.0995
n-Pentane	0.0755
n-Hexane	0.1166
CO2	0.0000

Рисунок 5 – Состав нижнего продукта C_3

Ключевыми этапами успешного моделирования являются: корректный выбор пакета свойств, тщательная подготовка исходных данных, последовательная конфигурация колонны и обязательная верификация результатов через проверку материальных и тепловых балансов.

Использование модулей Tray Sizing, Sensitivity Analysis и Optimizer позволяет не только спроектировать работоспособную колонну, но и найти оптимальные условия её эксплуатации, минимизируя энергозатраты при обеспечении требуемого качества продуктов.

Дальнейшее развитие навыков работы в современных пакетах моделирования химико-технологических процессов, включая освоение динамического моделирования и интеграции с системами автоматизированного управления, открывает перспективы для решения более сложных задач оптимального управления технологическими процессами в реальном времени.

Литература:

1. Павлов К.Ф. Романков П.Г., Носко А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов нефтехимической технологии. – М: Альянс, 2007.г. – 576с
2. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П.Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. Под ред. Ю. И. Дытнерского, 5-е изд., стереотипное. М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2010 — 496 с. ISBN 978-5-903034-87-1
3. Рудаков Д.Г. Расчет процессов ректификации с использованием программного комплекса Aspen HYSYS: методические указания. — Томск: ТПУ, 2021.
4. Universum: технические науки Архив выпусков журнала "Технические науки" 2023 3(108) СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ДЕЭТАНИЗАТОРА — Электронный ресурс: URL: <https://7universum.com> (дата обращения: 10.05.2026).
5. Моделирование ректификационной колонны в среде Aspen HYSYS. — Электронный ресурс: URL: <https://studfile.net> (дата обращения: 10.05.2026).

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАВОЗОХРАНИЛИЩ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

Даниленко А.С., Радионенко В.Н.
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

Рост продуктивности мясного и молочного скотоводства неизбежно увеличивает объёмы органических отходов, делая вопросы экологически безопасного хранения навоза одним из ключевых вызовов для современных сельскохозяйственных предприятий. Объекты хранения, особенно открытого типа, требуют оперативного внедрения технологий снижения выбросов загрязняющих веществ — не только ради соблюдения нормативов, но и для сохранения экологического баланса территорий размещения предприятий.

В условиях анаэробного хранения органических отходов животноводства навозохранилища генерируют интенсивные потоки газообразных выбросов, среди которых доминируют метан (CH_4), аммиак (NH_3), сероводород (H_2S) и летучие органические соединения.

Сельскохозяйственное предприятие «Агрокультура-Животноводство» — является действующим предприятием по разведению мясного, а также молочного крупного рогатого скота (КРС), а также по выращиванию зерновых культур. Общее поголовье скота составляет – 5500 голов, из них 2300 голов дойного поголовья. Количество навоза, хранящегося в навозохранилище, составляет – 82000 т/год, который хранится в навозохранилище открытого типа.

Ужесточение экологических требований и необходимость внедрения наилучших доступных технологий в животноводстве обуславливают потребность в научно обоснованных и экономически целесообразных решениях, адаптированных к конкретным масштабам производства.

Таким образом, целью данной работы является - разработка и обоснование практических мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от навозохранилищ сельскохозяйственных предприятий на примере СП «Агрокультура-Животноводство».

В работе проведен расчет выбросов загрязняющих веществ от навозохранилища исследуемого предприятия, который показал, что количество загрязняющих веществ составляет 107,77 т/год, из которых вещества 2 класса опасности – 0,56 тонн, 3 класса опасности – 1,41 тонн, 4 класса – 18,43 тонн, вещества, не имеющие класс опасности – 87,31 тонн.

Для оценки негативного воздействия на атмосферу был проведен расчет рассеивания с помощью программы УПРЗА «Экоцентр», который показал превышение показателей ПДК жилой зоны следующих веществ: аммиак, гидроксиметилбензол, метиламин, а также по группе суммации аммиак и сероводород.

Результаты расчета рассеивания по веществу «Гидроксиметилбензол» представлены на рисунке 1 в масштабе 1:5000.

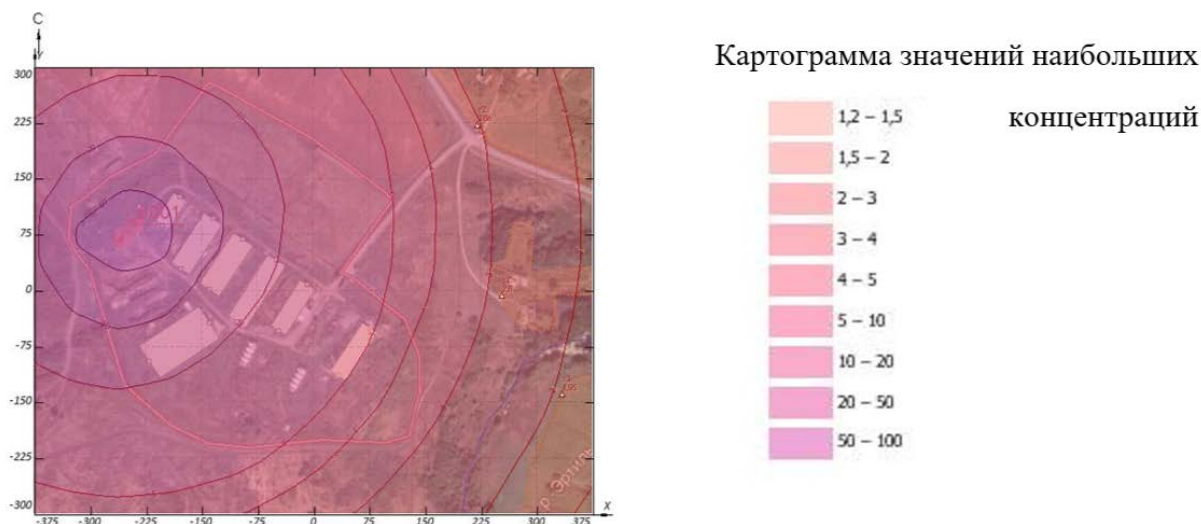


Рисунок 1 – Результаты расчета рассеивания по веществу «Гидроксиметилбензол»

Наибольшие значения составили по веществу «Гидроксиметилбензол» в жилой зоне: 3,06, которая достигается в точке № 2 «Точка на жилой зоне села Ячейка», $X=220,35$ $Y=222$, при направлении ветра 253° , скорости ветра 8 м/с, что создает риски для здоровья населения.

Анализ современных технологий улавливания и переработки выбросов загрязняющих веществ от навозохранилища показал, что наиболее рациональным решением для исследуемого предприятия является анаэробное сбраживание с когенерацией, обеспечивающее не только экологический, но и экономический эффект. Технологическая схема системы анаэробного сбраживания навоза с когенерацией энергии представлена на рисунке 2.

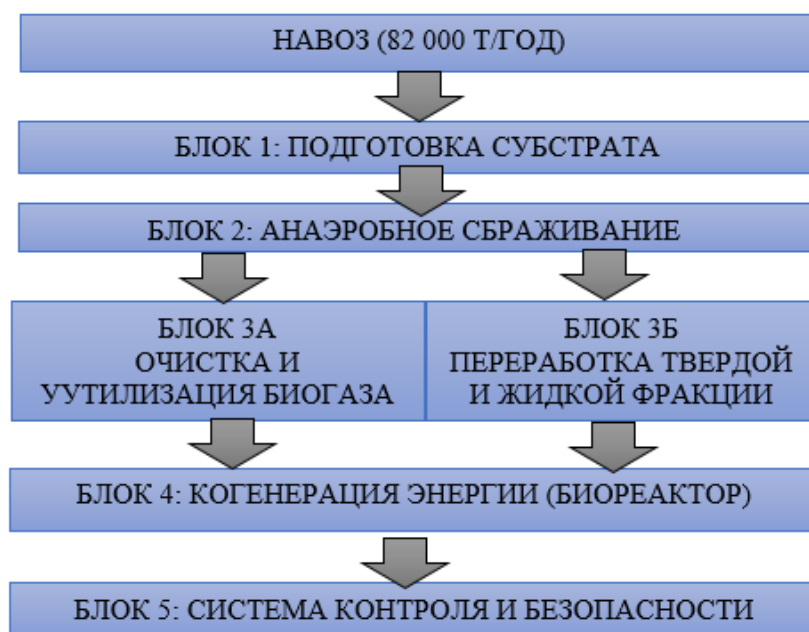


Рисунок 2 – Технологическая схема системы анаэробного сбраживания навоза с когенерацией энергии

Таким образом, выбранная нами схема, решает главную проблему — снижает количество выбросов от открытого навозохранилища. Анаэробное сбраживание в закрытом реакторе полностью изолирует навоз от атмосферы, а загрязняющие вещества собираются и используются. Очищенный биогаз идёт в когенерационную установку, которая производит электричество и тепло для нужд предприятия. Оставшийся после переработки навоз — это готовое органическое удобрение, которое можно вносить на поля.

Внедрение системы анаэробного сбраживания с когенерацией обеспечивает комплексное снижение негативного воздействия на атмосферный воздух за счёт следующих механизмов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Механизмы, обеспечивающие снижение негативного воздействия на атмосферный воздух

№	Механизм снижения воздействия	Экологические преимущества
1	Герметизация процесса сбраживания	Снижение выбросов CH_4 , NH_3 , H_2S . Ликвидация источника запаха; предотвращение попадания осадков в навозную массу
2	Улавливание и утилизация биогаза	Снижение парникового потенциала
3	Биологическая очистка биогаза от сероводорода	Отсутствие химических реагентов; минимизация вторичных отходов; защита оборудования от коррозии

В результате проведённой работы можно сделать выводы, что что количество загрязняющих веществ составляет 107,77 т/год, расчет рассеивания показал превышение показателей ПДК жилой зоны следующих веществ: аммиак, гидроксиметилбензол, метиламин, а также по группе суммации аммиак и сероводород, соответственно выбранная технологическая схема анаэробного сбраживания с когенерацией энергии обеспечивает не просто локальное снижение отдельных загрязнителей, а системное преобразование экологического профиля предприятия: объект хранения навоза трансформируется из источника диффузной эмиссии в контролируемый технологический узел с замкнутым циклом утилизации отходов и генерации энергии.

Литература:

1. Рекомендации по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от объектов животноводства и птицеводства: разработаны научно-исследовательским институтом охраны атмосферного воздуха от 01.09.2015. - Доступ из Электронного фонда правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/437016946> (дата обращения: 05.02.2025). – Текст: электронный.

2. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: утверждены приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273. – Москва, 2017 г. – Текст: непосредственный.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ

Голубев Д.И., Крымов В.Н.

Донецкий национальный технический университет

Цинкование является самым распространенным антикоррозионным покрытием. На цинкование расходуется не менее 50% производимого в мире цинка, а это около 12 млн. т. Объясняется это несколькими факторами.

Цинк довольно распространенный металл – содержание его в земной коре составляет $8 \cdot 10^{-3} \%$. Добыча, обогащение и получение цинка осуществляется по вполне традиционным технологиям пиро- и гидрометаллургии. Поэтому стоимость этого металла сравнительно невелика (\$ 3300 за т) – цинк немного дешевле алюминия и в четыре раза дешевле меди. Цинк достаточно технологичный металл. Он хорошо деформируется в теплом состоянии, его можно паять мягкими припоями. Изделия из цинка не токсичны, поэтому он может применяться в строительстве, из него изготавливаются предметы обихода.

Однако наибольшее внимание привлекает коррозионная стойкость цинка. В нейтральной среде изделия и покрытия из цинка могут работать несколько десятилетий. В мировой практике есть немало примеров работы оцинкованных емкостей для воды на протяжении 50-60 лет.

На сегодня известно несколько технологий получения цинковых покрытий. Наиболее известными и распространенными способами являются:

- погружением в расплав (горячее цинкование);
- электрохимическое осаждение;
- термодиффузионное;
- газотермическое. Обычно применяется дуговая металлизация.

Менее известны вакуумное осаждение и механическое цинкование.

Несмотря на то, что термодиффузионное цинкование (ТДЦ) было разработано в начале 20-го века [1], широкому кругу инженеров оно известно в меньшей степени, чем гальваническое или горячее.

К важнейшим преимуществам ТДЦ относят:

- низкие капитальные затраты на организацию производства;
- отличная однородность слоя даже на изделиях сложной формы;
- коррозионная стойкость покрытия сопоставима (зависит от условий эксплуатации) с горячим и в несколько раз превышает гальваническое и газотермическое;
- возможность наносить покрытие на изделия из высокопрочных сталей и пр.

Как правило, при этом не упоминается еще одно преимущество ТДЦ – высокая экологичность.

Не касаясь свойств и эксплуатационных характеристик покрытий, рассмотрим этот аспект в сравнении с гальваническим способом.

Гальванический метод (ГЦ) является наиболее массовым и распространенным способом, хотя по тоннажу оно и уступает горячему цинкованию. ГЦ применяется в самых различных сферах промышленности: в электротехнической, автомобильной, строительстве и т.п. преимущественно ГЦ подвергают изделия небольшого размера. Однако сегодня широко применяется ГЦ рулонного автомобильного листа. Есть примеры гальванического цинкования и другой металлургической продукции.

Как и любой гальванический процесс, цинкование сопряжено с использованием электролитов разного состава, травильных и промывочных растворов, составов окончательной обработки. В общем случае, технология ГЦ состоит из следующих операций:

- промывка;
- травление;
- декапирование;
- нанесение покрытия;
- промывка;
- хроматирование и иная окончательная обработка.

Как правило, все вещества, применяемые при ГЦ относятся к 1, 2-му классам опасности.

Применяемые вещества, а также вредные факторы технологических операций сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ вредных факторов некоторых технологических операций процесса гальванического и диффузионного цинкования

Операция, применяемые вещества	ГЦ	ТДЦ
<u>Промывка.</u> Синтетические моющие средства	Обязательная операция. Анионактивные, неионогенные ПАВ. Обладают ко канцерогенным, эмбриотоксическим и тератогенным эффектом [2]	Может не применяться
<u>Травление</u> Растворы неорганических кислот	Применяется при наличии ржавчины и окалины. Вещества 1 класса опасности	Применяется при наличии ржавчины и окалины
<u>Декапирование</u>	То же	Не применяется
<u>Нанесение покрытия</u>	Электролиты на различной основе: кислотные борфтористые, цианатные (1 класс опасности) и др.	Смесь состава, % масс.: - цинковый порошок 5-50. 3 класс опасности ¹⁾ ; - хлористый аммоний 1-2; - песок остальное
<u>Промывка</u>	То же	Не применяется
<u>Окончательная обработка</u>	Хроматирование. Ионы CrO^{6+} вещество первого класса опасности.	Может применяться фосфатирование в растворах солей фосфорной к-ты ²⁾

Примечания. 1) зависит от пути попадания в организм; 2) смесь реактивов. Относятся ко 2 классу в водном растворе

Рассмотрим подробнее некоторые вредные факторы гальванического процесса цинкования.

Опасные вещества могут попадать в организм как работающих непосредственно на производстве, так и окружающих людей несколькими путями. При попадании таких веществ в воздух, грунтовые воды или почву, это могут быть:

- пероральным путем;
- ингаляционным;
- кожная экспозиция (при попадании загрязненной воды).

Вещества, применяемые при гальваническом цинковании способны вызывать заболевания целого ряда органов (табл. 2).

Таблица 2 – Заболевания, вызываемые веществами, применяющимися при гальваническом цинковании [3]

Вещества	Путь поступления		
	пероральный	ингаляционный	накожный
Соли цинка	Эрозия слизистой желудка		Контактный дерматит
Кислоты	Эрозия слизистой желудка;	1. Катаракта, конъюнктивит; 2. Бронхит, трахеит	Контактный дерматит
Щелочи	Эрозия слизистой желудка		Контактный дерматит
Соединения хрома	1. Эрозия слизистой желудка; 2. Опухоли полости рта	1. Бронхит, трахеит; 2. Опухоли органов дыхания	

Источниками вредных веществ являются гальванические ванны, промывочные ванны и ванны хромирования. Хотя электролиты и растворы из данных устройств категорически запрещено сливать в канализацию, электролиты могут попадать в атмосферу в значительных количествах путем образования аэрозолей.

Электролиты и промывочные воды подлежат очистке. Как правило, применяются электрохимические способы. Однако применительно к гальваническому производству могут возникать административные противоречия, зачастую делающие очистку неэффективной. Например, согласно рекомендациям [4], процесс очистки сточных вод от шестивалентного хрома и других металлов осуществляется при содержании только ионов шестивалентного хрома Cr^{+6} с концентрацией до 100 мг/л. Это связано с резким снижением электропроводности раствора. При этом качественная очистка возможна только при концентрации до 50 мг/л.

Согласно данным Карпова Н.Я. при замене цианистого электролита цинкования на сернокислый при одинаковой концентрации ионов цинка и неизменных системах промывки деталей и очистки кислотно-щелочных стоков экологический критерий технологии цинкования ухудшается в сотни раз из-за

технической возможности практически полной очистки стоков от цианидов (до ПДК) и незначительной степени очистки сточных вод от сульфатов (до 30%).

Как показывают исследования наибольшую опасность как для работающих на производстве, так и для окружающей среды представляют аэрозоли. Аэрозоли образуются непосредственно при работе ванны по нескольким механизмам:

- формирование потоков электролита. Они могут образовываться как вследствие конвекции, так и при механическом перемешивании ванны;
- вынос электролита схлопывающимися пузырьками воздуха при барботаже;
- вынос электролита пузырьками выделяющегося водорода.

Опасность аэрозолей объясняется двумя причинами: способностью распространяться на значительные расстояния и способностью содержать твердые частицы [5, 6].

Как показали измерения, при гальваническом цинковании максимальная доля аэрозоля приходится на частицы размером до 0,3 мкм. Такие частицы представляют наибольшую опасность для клеток любого организма. В природе практически не встречаются частицы такого размера, содержащие металлы, поэтому за годы эволюции не было выработано подходящего механизма ответа на этот поражающий фактор.

Твердые частицы, полученные из капель аэрозоля характеризуются значительным разбросом размеров: от нанометров, до сотен микрометров [6]. Это объясняется высокой склонностью твердых частиц к агрегатированию. Индивидуальные твердые частицы могут иметь разную форму, но часто встречаются дендритообразные и даже иголообразные. Такая форма наиболее опасна, поскольку является цитотоксичной. Острые тонкие концы частиц способны вызывать значительные механические повреждения клеточных оболочек, что в свою очередь приводит к смерти клеток.

Кроме собственно цинка твердые агрегатированные частицы могут содержать другие металлы. Отмечено, в частности, наличие меди. Очевидно, что медь попадает в электролит из токопроводящих шин.

Сравнивая с гальваническим (табл. 1), можно отметить, что ТДЦ характеризуется наличием только одного опасного вещества – цинка. Из приведенных в табл. 2 механизмов попадания в организм, наиболее опасным является ингаляционный.

Анализируя технологический процесс ТДЦ, можно отметить, что частицы цинка выделяются, в основном, на этапе выгрузки садки из агрегата. Этому способствуют конвективные потоки воздуха, исходящие из нагретых деталей, поскольку садку обычно выгружают при температуре около 100 °С.

Бороться с пылением при разгрузке печи можно двумя способами.

1. Применением вентиляции. Чаще всего над печью или местом разгрузки съемной реторты устанавливают вытяжной зонт, соединенный с фильтром.

2. Путем герметизации. Этот вариант сложнее, поскольку предполагает использование желобов или рукавов, по которым и происходит выгрузка

цинкующей смеси и изделий из реторты.

Применяющийся при окончательном фосфатировании фосфат цинка не относится к токсичным веществам. Он не вызывает отравлений при попадании в организм пероральным путем. Несколько большую опасность для легких представляет пыль. На кожу фосфат цинка может вызывать раздражающее действие. Тем не менее, при работе с этим веществом рекомендуется применять обычные средства защиты – рабочие перчатки и респиратор.

Единственным отходом ТДЦ является отработанная смесь, которая используется многократно. Смесь, в основном, состоит из кварцевого песка и оксидов цинка и железа. Такой материал безопасно может утилизироваться в строительстве для приготовления цементных растворов.

Таким образом сравнение вредных факторов, которые образуются при гальваническом и термодиффузионном цинковании приводит к следующим выводам.

1. ГЦ характеризуется наличием вредных и опасных факторов на каждой технологической операции.

2. ТДЦ характеризуется значительно меньшим вредным воздействием на экологию. И в меньшей степени ухудшает условия труда.

Литература:

1. United States patent №701298. Process of depositing metals on metallic surface and the product thereof. Appl. 24.07.1901: date 03.06.1902 / Sherard Cowper Coles.

2. Сидорин, Г.И. Методология прогнозирования риска токсического воздействия современных средств бытовой химии / Г.И. Сидорин, Л.В. Луковникова, Л.И. Дьякова и др. - Медицина труда и промышленная экология. - №4. – 2009. – С. 6-10

3. Вострикова, С.М. Расчёт социально-экономического ущерба от загрязнения окружающей среды гальваническим производством / С.М. Вострикова. – Электронный журнал «Труды МАИ». – Вып. №36. – С. 1-20.

4. Яковлев, С.В. Очистка производственных сточных вод / С.В. Яковлев, Я.Н. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов. – Москва: Стройиздат, 1985. – 511 с.

5. Голохваст, К.С. Содержание нано- и микрочастиц в воздухе рабочей зоны гальванического производства: пилотное исследование / К.С. Голохваст, К.Ю. Кириченко, П.Ф. Кику, И.А. Вахнюк и др. // Анализ риска здоровью. – 2019. – № 3. – С. 34–41. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.04.

6. Вахнюк, И.А. Экологическая оценка гальванического производства: специальность 1.5.15 «Экология (технические науки)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вахнюк Игорь Анатольевич; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет». – Владивосток, 2022. – 104 с.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КОЛОННЫХ АППАРАТОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Колотушкин Р.Р., Ошовский В.В.

Донецкий национальный технический университет

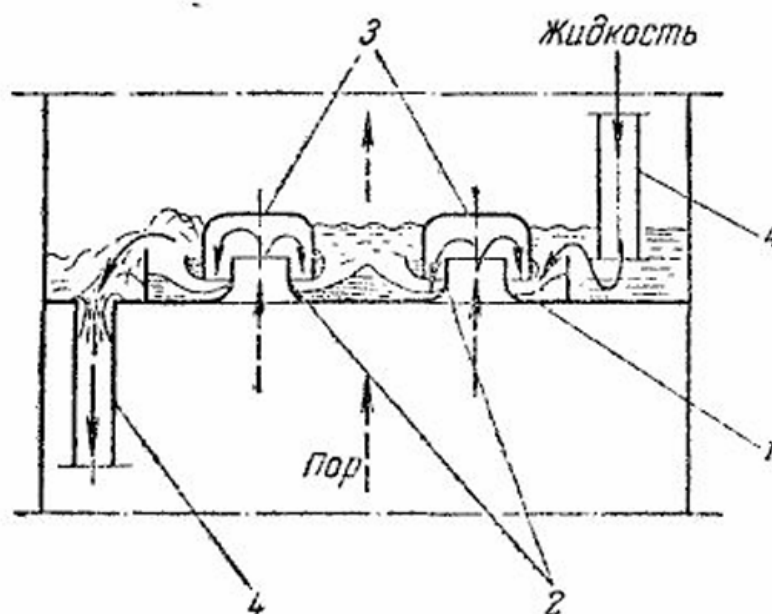
Колонные аппараты (в том числе и колпачковые колонны) представляют собой устройства, используемые в процессах дистилляции и ректификации для обеспечения тепло- и массообмена между паром и жидкостью (флегмой).

При этом колонна обычно это вертикальный цилиндр с расположенными на разной высоте тарелками. В тарелках сделаны специальные отверстия под размер колпачков и под размер перевёрнутого колпачка для отвода излишков флегмы. Для пара предусмотрено несколько входов на каждом уровне, а для перелива флегмы на нижний этаж - один [2].

Данные аппараты нужны для эффективного проведения процессов тепломассообмена между паром и жидкостью, что позволяет получать продукты высокого качества в различных отраслях [3, 4].

Основными причинами использования колонных (колпачковых) аппаратов являются: эффективный тепломассообмен; высокая разделительная способность тарелок; устойчивость работы при изменениях уровня нагрева, колебаниях отбора и в широком диапазоне мощностей.

На рисунке 1 подробно показан, а далее описан принцип работы колонны.



1 - тарелка; 2 - газовые патрубки; 3 - колпачки; 4 - сливные трубки.

Рисунок 1 – Схема работы колпачковой тарелки

Газ на тарелку 1 поступает по патрубкам 2, разбиваясь затем прорезями колпачка 3 на большое число отдельных струй. Прорези колпачков наиболее часто выполняются в виде зубцов треугольной или прямоугольной формы. Далее газ проходит через слой жидкости, перетекающей по тарелке от одного

сливного устройства 4 к другому. При движении через слой значительная часть мелких струй распадается и газ распределяется в жидкости в виде пузырьков. Интенсивность образования пены и брызг на колпачковых тарелках зависит от скорости движения газа и глубины погружения колпачка: в жидкость [1].

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель физического объекта, процесса или системы, которая точно воспроизводит поведение оригинала и синхронизирована с ним в режиме реального времени [5].

В производстве цифровой двойник - это виртуальное представление физического процесса в том виде, в каком он спроектирован, построен и обслуживается, которое дополнено технологическими параметрами и аналитикой в режиме реального времени. Представленные данные основываются на точных конфигурациях технологического процесса, параметрах входящих и выходящих потоков. По сути, это операционный контекст цифрового двойника, необходимый для поддержки оптимизации производительности технологической установки.

Назначение цифровых двойников технологических процессов нефтехимии - в условиях сложных многопараметрических химических процессов помогать аппаратчикам производств, инженерам и технологам принимать оптимальные решения, а в некоторых случаях двойники позволяют полностью исключить человеческий фактор.

В данной работе рассматривается возможность создания цифровых двойников процессов химической технологии с использованием современных программных комплексов и микроконтроллерных средств.

При моделировании в колонных (тарельчатых) аппаратах важно учитывать такие параметры, как: состав газа и жидкости, начальная и конечная концентрация извлекаемого компонента, вид абсорбента и его начальная концентрация, а также коэффициент избытка абсорбента [6].

Модели для расчёта абсорбции (в которых участвуют колонные колпачковые колонны) в цифровых двойниках включают математические описания процессов, учитывающие материальный и тепловой балансы, массопередачу, физико-химические свойства компонентов и параметры оборудования; которые разрабатываются и реализуются в специализированных программных продуктах и средах.

При выборе модели или программного пакета (Aspen Hysys, ChemCAD) учитывают специфику процесса (тип колонного аппарата, физико-химические свойства реагентов), требуемую точность расчётов и доступные ресурсы для моделирования.

Задача реализации цифрового двойника подразумевает создание виртуальной копии, способной с некоторой точностью имитировать протекание процессов, происходящих в различных частях физической установки. В данном случае в виде виртуальной копии может выступать имитационная цифровая модель или соответствующая модель машинного обучения. При этом возможен последовательный переход с первой на вторую, по мере накопления архивных данных о проводимом процессе и формирования обучающей выборки. В обоих

случаях основным условием является функционирование в режиме реального времени (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема процесса создания и использования цифрового двойника.

Таким образом, предложена концепция цифрового двойника колонных аппаратов химической технологии, а создание цифровых двойников предоставляет целый ряд новых инновационных возможностей для эффективного развития химической отрасли в современных условиях.

Литература:

1. А.Г.Касаткин ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ: Учебник для вузов. - 10-е изд., стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. - М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. - 753 с.
2. Тарельчатые колонны для дистилляции: в чём разница и как выбрать? [Электронный ресурс] // DoctorGuber.ru: сайт. - URL: https://www.doctorguber.ru/book/reviews/articleletarelchatye_kolonny_dlya_distillyatsii_v_chem_raznitsa_i_kak_vybrat/
3. Стеклянная медная колпачковая колонна [Электронный ресурс]// Solodovy-pogreba.ru:сайт.-URL:https://solodovy-pogreba.ru/articles/steklyannaya_mednaya_kolpachkovaya_kolonna/
4. Колпачковые колонны [Электронный ресурс] // Homer-beer.ru: блог. - URL: <https://homer-beer.ru/blog/oborudovanie/kolpachkovye-kolonny.html>
5. Что такое цифровой двойник и где применяется эта технология [Электронный ресурс]// NUR.KZ : информационно-правовой портал. - URL: <https://www.nur.kz/technologies/software/2172049-cto-takoe-cifrovoy-dvoynik-i-gde-primenyaetsya-eta-tehnologiya/>
6. РАСЧЕТ АБСОРБИЦИОННЫХ УСТАНОВОК [Электронный ресурс]: самост. учеб. электрон. изд./ Сыкт. лесн. ин-т; сост. Т. Л. Леканова, Е. Г. Казакова. - Электрон. дан. (1 файл в формате pdf: 2,2 Мб). - Сыктывкар : СЛИ, 2010. - Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. - Загл. с экрана.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕЦИКЛИНГА ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ КОКСОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Паневина М.А., Федотов О.В.

Донбасский государственный технический университет

В современном мире из-за высокого потребления дорогостоящего топлива актуальность экономии энергоресурсов играет важную роль в научных исследованиях. Среди приоритетных направлений стратегического развития науки в сфере ресурсосбережения является более эффективное использование ресурсов, снижение вреда экологии, развитие технологий глубокой переработки сырья и создание наукоёмких решений для ключевых секторов экономики.

Транспортировка и многочисленные перегрузки в коксовых цехах сопровождаются образованием большого количества пыли, которая представляет определенный технологический интерес, имея состав близкий к составу коксовой шихты. Кроме того, распространение ее по цеху негативно сказывается на условиях работы персонала и оборудования, а также вызывает загрязнение окружающей среды. При выгрузке кокса из камер также образуется большое количество коксовой пыли, являющейся ценным сырьевым ресурсом.

Поэтому утилизация этих отходов при производстве кокса является актуальной научно-технической задачей, решение которой будет способствовать ресурсосбережению. Необходимо отметить, что наличие пылевидных отходов в шихте может отрицательно влиять на процесс коксования из-за резкого снижения ее газопроницаемости и выдувания пылевидных частиц воздушными потоками при загрузке в печь.

Одним из наиболее целесообразных способов борьбы с распространением угольной пыли на производстве и повторного ее использования является технология частичного брикетирования. Согласно источнику [1] количество брикетов в шихте должно составлять не более 30% от массы загрузки в камеру коксования.

Данная технология позволяет:

- снизить пылеобразование на производстве, улучшая условия труда и экологическую обстановку;
- увеличить производительность цеха за счет повышения плотности коксового пирога;
- оптимизировать процесс коксования за счет более равномерного распределения шихты в коксовых камерах, улучшения газопроницаемости и равномерности прогрева;
- снизить расход традиционной угольной шихты.

В качестве связующих элементов при этом могут быть использованы отходы основного коксохимического производства.

Однако введение в шихту связующих добавок может отрицательно влиять на качество конечного продукта, поэтому их количество для брикетирования не должно превышать 10% при оптимальных 4-5% по массе [2].

Целью данной работы являлось исследование основных параметров коксовой шихты, состоящей из пылевидных отходов и связующих. В качестве связующих были использованы отходы коксохимического производства – коксовая пыль, фусы коксования и каменноугольная смола. Коксовая пыль представляет собой мелкодисперсный сыпучий отход, возможность использования которого в качестве связующего была описана в работе [3]. Фусы коксования и каменноугольная смола могут быть использованы в качестве связующих веществ за счет своего пластического и вязкого агрегатного состояния [4, 5].

При проведении исследований отмеченные связующие добавлялись к угольной пыли в количестве 1%, 3% и 5% и определялись значения влажности, зольности, выхода летучих веществ и содержания общей серы в полученных смесях. Каждый эксперимент проводили 3 раза, а полученные результаты усредняли и сравнивали с основными показателями коксовой шихты (табл. 1).

Таблица 1 – Основные показатели шихты для получения кокса

Влага W, %	Зольность A, %	Сера S, %	Выход летучих веществ V, %
Не более 8 [6] 12,8*	Не более 10 [6] 7,9*	Не более 1% [6] 0,46*	25 [2] 30*

* – Средние значения показателей шихты действующего производства.

Определение *общей влаги* проводилось согласно ГОСТ 52911-2020. За результат были приняты средние значения рассчитанной влажности. Навески топлива помещались в выпарительные чаши, и выпаривание влаги проводилось в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С. Результаты опытов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Массовая доля влажности шихты в зависимости от вида связующего вещества

Концентрация связующего, %	Связующее вещество		
	Коксовая пыль	Фусы коксования	Смола каменноугольная
1	10,01	8,67	8,17
3	8,61	8,20	9,08
5	9,35	9,61	9,62

Из всех полученных результатов наименьшей массовой долей влажности обладает смесь с добавлением 1% каменноугольной смолы (8,17%). Все полученные данные по влажности удовлетворяют ГОСТ Р 57016-2016 и не превышают 11,0%, что является положительным результатом.

Определение *зольности* проводилось согласно ГОСТ 55661-2013 по методу ускоренного озоления. За результат были приняты средние значения рассчитанной зольности. Навески топлива помещались в фарфоровые лодочки, и прокаливание проводилось в муфельной печи при температуре 800-815 °С. В ходе проведенного эксперимента были получены следующие данные по зольности смесей (табл. 3).

Таблица 3 – Зольность шихты в зависимости от вида связующего вещества

Концентрация связующего, %	Связующее вещество		
	Коксовая пыль	Фусы коксования	Смола каменноугольная
1	6,03	7,66	7,43
3	6,66	7,85	7,53
5	7,34	8,40	8,59

Анализируя полученные данные, наименьшей зольностью обладает смесь с добавлением 1% коксовой пыли (6,03%). Все полученные данные по зольности удовлетворяют ГОСТ Р 57016-2016 и не превышают 25,0%, что является положительным результатом.

Определение *выхода летучих веществ* проводилось согласно ГОСТ 55660-2013. За результат были приняты средние значения рассчитанной зольности. Навески топлива помещались в фарфоровые тигли, накрывались крышками и прокаливались в муфельной печи при температуре 900 °С. Полученные данные по количеству выхода летучих веществ в смесях приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Выход летучих веществ из шихты в зависимости от вида связующего вещества

Концентрация связующего, %	Связующее вещество		
	Коксовая пыль	Фусы коксования	Смола каменноугольная
1	19,80	21,30	21,71
3	21,22	22,10	21,59
5	17,82	20,81	24,19

На основании полученных результатов наименьшим выходом летучих обладает смесь с добавлением 5% коксовой пыли (17,82%). Все полученные данные по выходу летучих удовлетворяют и не превышают 25,0% [2], что является положительным результатом.

Определение *общей серы* в топливе проводилось согласно ГОСТ 8606-2015 по методу Эшка. За результат были приняты средние значения рассчитанной серы. Спекание смеси Эшка с шихтой проводилось в муфельной печи при температуре 800 °С, полученный спеченный продукт растворялся в соляной кислоте, а раствор подвергался фильтрованию и соединялся с хлоридом бария для получения сульфата бария. Осадок сульфата бария осаждался на фильтре и проходил прокаливание в тигле при нагреве в муфельной печи. Количество серы в смеси, полученное в ходе эксперимента, приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Массовая доля общей серы шихты в зависимости от вида связующего вещества

Концентрация связующего, %	Связующее вещество		
	Коксовая пыль	Фусы коксования	Смола каменноугольная
1	0,9618	0,1374	0,1374
3	0,4122	0,1374	0,1374
5	0,2748	0,2704	0,2704

Среди полученных данных наименьшей массовой долей серы обладает смесь с добавлением 1% и 3% фусов коксования и смолы каменноугольной

(0,1374%). Все полученные данные по сере удовлетворяют ГОСТ Р 57016-2016 и не превышают 1,0%, что является положительным результатом.

Экспериментально установлено, что качественные показатели исследуемых смесей удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 57016-2016, а их значения не превышают соответствующих значений в шихте, используемой при производстве кокса.

В ходе дальнейших исследований предполагается проведение экспериментов для получения брикетов из исследованных смесей и определения их механических свойств.

Литература:

1. Харлампович, Г.Д. Технология коксохимического производства / Г.Д. Харлампович, А.А. Кауфман. – М.: Metallurgy, 1995. – 384 с.
2. Кауфман, А.А. Мастер коксового производства / А.А. Кауфман, А.З. Смелянский, Г.Д. Харлампович, Н.В. Браун. – М.: Metallurgy, 1994. – 240 с.
3. Кравцов, В.П. Актуальность технологии брикетирования коксовой пыли / В.П. Кравцов, А.В. Папин // Вестник КузГТУ. – 2012. – №4(92). – С. 112–113.
4. Хаимов, Г.Я. Применение и транспортирование нефтяных битумов / Г.Я. Хаимов. – М.: Химия, 1968. – 182 с.
5. Гаврилов, Ю.В. Переработка твердых природных энергоносителей / Ю.В. Гаврилов, Н.В. Королева, С.А. Синицин; под ред. Н.Г. Дигурова. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. – 159 с.
6. Лейбович, Р.Е. Технология коксохимического производства / Р.Е. Лейбович, Е.И. Яковлева, А.Б. Филатов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1982. – 360 с.

ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИИ КАК СЫРЬЕВОЙ РЕСУРС ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВКИ

Пастухов И.Б., Асламова Я.Ю., Полухина С.В.
Донецкий национальный технический университет

Развитие промышленного потенциала Донбасса неразрывно связано с накоплением значительных объемов железосодержащих отходов металлургического производства. Многолетнее складирование этих отходов в отвалах и шламонакопителях создаёт серьёзную экологическую нагрузку по почву и водные объекты региона. В тоже время предприятия водопроводно-канализационного хозяйства испытывают потребность в эффективных железосодержащих коагулянтах для обеспечения качества очистки воды. Реализация принципов циркуляционной экономики открывает перспективный путь решения этих задач путём вовлечения отходов чёрной металлургии в качестве вторичного сырья для производства востребованных химических реагентов. Данная работа посвящена анализу научно-технических перспектив интеграции технологий переработки металлургических отходов в систему коммунального водоснабжения региона.

Для получения коагулянтов подходят следующие виды железосодержащих отходов (ЖСО) металлургии: шлаки сталеплавильного производства, пыль электрофильтров, окалина, шламы, отработанные травильные растворы [1-3], их краткая характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Основные отходы металлургии для получения коагулянтов

Вид отхода	Краткое описание	Возможный коагулянт
Сталеплавильные шлаки	Электросталеплавильные, саморассыпающиеся	Железосиликатный коагулянт
Пыль электрофильтров	Пыль электродуговых печей	Железосодержащий коагулянт
Окалина	Отход горячей обработки стали	Сульфат/хлорид железа
Шламы	Мелкие отходы, шламовые осадки	Железосодержащий коагулянт
Травильные растворы	Серноокислые, солянокислые растворы	Хлорид/сульфат железа (III)

Использование ЖСО металлургии для получения коагулянтов вместо покупных реагентов даёт ряд существенных преимуществ:

1. Экономическая выгода за счёт снижения затрат на реагенты и утилизацию отходов. Переработка отходов позволяет получать коагулянты непосредственно на металлургическом предприятии. Кроме того, предприятие не только не тратит средства на утилизацию отходов, но и получает дополнительный продукт, который можно использовать или продавать.

2. Экологические преимущества, которые достигаются путём уменьшения объём отходов, подлежащих захоронению или складированию; внедрения

элементы циркулярной экономики (отходы одного производства становятся сырьём для другого).

3. Технологические плюсы проявляются в том, что коагулянты, полученные из металлургических отходов, по своим свойствам не уступают традиционным, а иногда и превосходят их по скорости коагуляции и качеству очистки. Также можно гибко регулировать состав и концентрацию получаемого коагулянта в зависимости от специфики сточных вод.

4. Предприятие водоподготовки становится менее зависимым от поставок химических реагентов, что особенно важно в условиях нестабильного рынка или санкций.

5. В процессе переработки отходов могут быть получены и другие полезные продукты (например, гипс, который используется в строительстве).

Анализ источников [1-4] позволил сформулировать такие основные этапы технологии получения коагулянтов из ЖСО:

1. Подготовка сырья. ЖСО (шламы, окалина, пыль) измельчаются и при необходимости просушиваются.

2. Растворение. Отходы обрабатывают минеральными кислотами (чаще всего серной или соляной) при нагревании. В результате железо переходит в раствор в виде солей железа (II) или (III).

3. Окисление. Если в растворе преобладает железо (II), его окисляют до железа (III) с помощью кислорода воздуха или других окислителей. Это повышает коагулирующую способность продукта.

4. Нейтрализация и осаждение. Полученную суспензию нейтрализуют (например, отходами хлорида кальция), что приводит к выпадению в осадок гипса (сульфата кальция), а в растворе остаётся хлорид или сульфат железа (III).

5. Фильтрация и сушка. Осадок отделяют на фильтр-прессе, сушат и используют как побочный продукт (например, гипс). Фильтрат, содержащий коагулянт, подвергают вакуумной кристаллизации, отделяют кристаллы коагулянта, сушат и измельчают до нужной фракции.

7. Возврат оборотных растворов. Оставшийся после кристаллизации раствор возвращают в начало процесса для повторного использования.

Пример технологической схемы получения коагулянта из ЖСО приведен в таблице 2.

Для внедрения схемы (табл.2) на конкретном предприятии требуется провести лабораторные испытания и адаптировать параметры процесса под состав имеющихся отходов.

Первостепенным и логичным является вопрос безопасности использования ЖСО для очистки воды. Обеспечить безопасность можно при соблюдении следующих условий.

Во-первых, должны быть обеспечены контроль и минимизация потенциальных опасных веществ в отходах, используемых для получения коагулянтов. Основной риск при использовании ЖСО связан с присутствием в них тяжёлых металлов, мышьяка, органических соединений, радионуклидов,

которые могут перейти в очищаемую воду. В ходе контроля необходимо на первом этапе провести всесторонний анализ конкретного вида отхода. Этот анализ должен включать определение микро- и макроэлементного состава и потенциально опасных примесей. Только отходы с приемлемым исходным составом могут рассматриваться как сырье.

Таблица 2 – Технологическая схема получения железосодержащих коагулянтов из металлургических отходов

Этап	Описание	Результат
Подготовка	Измельчение и сушка отходов	Однородная масса
Растворение	Обработка H_2SO_4 или HCl при 40–80°C	Раствор солей железа
Окисление	Продувка воздухом или добавление окислителя	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$
Нейтрализация	Добавление $CaCl_2$ до pH 7–7,5	Осадок гипса, раствор $FeCl_3$
Фильтрация	Отделение гипса	Гипс (побочный продукт)
Кристаллизация	Вакуумное выпаривание	Кристаллы $FeCl_3 \cdot 6H_2O$
Сушка и измельчение	Сушка при 100–110°C	Готовый коагулянт

Технологии переработки отходов в коагулянт должны быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить максимальное извлечение железосодержащего компонента и минимальный переход нежелательных примесей в конечный продукт. Этого можно достигнуть такими методами:

1. Селективное растворение (выщелачивание). Выбор условий (pH, температура, реагенты), при которых железо эффективно переходит в раствор, а вредные примеси остаются в твёрдой фазе или осаждаются на более ранних стадиях.

2. Очистка промежуточных продуктов. При необходимости могут быть применены дополнительные стадии очистки получаемых растворов или суспензий для удаления примесей.

3. Термическая обработка. Некоторые отходы могут быть термически обработаны для изменения фазового состава, удаления органики или примесей.

Во-вторых, полученные из ЖСО коагулянты должны отвечать всем требованиям, предъявляемым к коммерческим коагулянтам, используемым для водоподготовки [5,6]. Важно подчеркнуть, что процесс получения коагулянта из отходов не должен снижать планку требований к чистоте и безопасности продукта по сравнению с традиционными реагентами. Каждая партия произведенного коагулянта должна проходить строгий лабораторный контроль на соответствие стандартам.

В-третьих, перед полномасштабным использованием крайне важны пилотные испытания на реальных объектах водоподготовки. Это позволит не только подтвердить эффективность, но и отслеживать качество очищенной

воды по всему спектру показателей для подтверждения отсутствия вторичного загрязнения.

Таким образом, исследование показало, что ЖСО металлургической промышленности Донбасса представляет собой не просто экологическую проблему, но ценный вторичный сырьевой ресурс для получения коагулянтов. Использование ЖСО для очистки воды – это современная, экономически и экологически обоснованная технология. Кроме того, это не просто инновационное направление, но и стратегически важное решение для ДНР. Оно позволяет не только обеспечить население качественной питьевой водой в условиях, когда это является одним из ключевых приоритетов, но и демонстрирует потенциал региона в построении циклической экономики, повышении его экологической и экономической самостоятельности. Дальнейшие исследования по внедрению этой технологии могут заложить основу для создания ресурсоэффективной системы водоснабжения в ДНР.

Литература:

1. Старостина, И.В. Получение железокремниевого флокулянта-коагулянта из отхода металлургического производства и его применение в процессе очистки эмульгированных сточных вод / И.В. Старостина, Н.Ю. Кирюшина, Е.В. Локтионова, А.В. Матушкина // Экология и промышленность России. – 2022. - № 26(7). – С. 20-25.
2. Бархатов В.И., Добровольский И.П., Капкаев Ю. Ш., Головачев И.В.; ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет». Способ получения железосодержащего коагулянта из отходов производств. Патент № 2702572 РФ, МПК C01G 49/10. №2018128261, заявл. 01.08.2018; опубл. 08.10.2019 Б ю л. №. 28
3. Сапронова, Ж. А. Технология получения железосодержащего коагулянта из отходов сталеплавильного производства для очистки ливневых вод / Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова, А.В. Святченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. - 2016. - № - 12. - С. 160-164.
4. Использование производственных отходов для очистки сточных вод / Н. С. Лупандина, Н. Ю. Кирюшина, Ж. А. Свергузова, Д. А. Ельников // Экология и промышленность России. – 2010. – № 5. – С. 38-41.
5. ГОСТ Р 51642-2000 - «Коагулянты для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Общие требования и метод определения эффективности».
6. СанПиН 2.1.4.559-96 – «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА КОКСОВОГО ГАЗА

Попова А. Э., Куберский С. В.

Донбасский государственный технический университет

Коксовый газ (КГ) является одним из побочных продуктов коксования из которого получают каменноугольную смолу, сульфат аммония, сырой бензол и сероводород. Очищенный КГ используется в коксовых батареях, металлургических печах, для производства электроэнергии и т.д. Поэтому определенный интерес и актуальность представляет проблема прогнозирования его выхода.

Для решения этой задачи был использован метод машинного обучения с целью построения модели логистической регрессии на основании производственных данных о выходе КГ при использовании различных видов коксовой шихты. Выборка состояла из физико-химических характеристик шихты (содержание влаги, W , %; содержание золы, A , %; содержание серы, S , %; выход летучих на сухую массу, V_d , %; выход летучих на горючую массу, V_{daf} , %; ширина пластинчатого слоя, Y , мм; средний показатель отражения витринита, R_o , ед.; индекс основности золы, I_o , ед.; индекс основности угля, I_u , ед.) и выхода КГ в процентах от тонны сухой шихты. Кроме того, из-за большого количества входных признаков было принято решение построить и упрощенную модель, а также сравнить точность ее прогноза с базовой моделью.

Для построения моделей требовался признак, основанный на выходе КГ, который будет характеризовать стабильность процесса выхода продукта. В условиях отсутствия экспертной разметки стабильности выхода КГ необходимо формирование объективного критерия его оценки, что может быть реализовано с помощью статистического метода контроля процесса — метода контрольных карт (КК). В данной работе использовались два вида КК — карта экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA) и карта кумулятивных сумм (CUSUM), опирающихся на прошлые наблюдения, то есть обладающие некой «памятью», что отличает их от контрольной карты Шухарта [1]. Совместное использование карт EWMA и CUSUM позволяет разработать систему, способную обнаруживать разнообразные виды отклонений от нормального состояния. В результате для каждого наблюдения формируется бинарная переменная «у», принимающая значение 1 при нестабильном процессе и 0 в условиях относительно стабильного выхода КГ. Наблюдение будет относиться к нестабильному состоянию, если выполняет хотя бы одного из условий:

- значение EWMA выходит за верхнюю (ULS) или нижнюю (LCL) контрольную границу;
- превышение положительной суммы отклонений (CUSUM+) или отрицательной суммы отклонений (CUSUM-) установленного порога h .

Основываясь на графиках контрольных карт (рис. 1), можно сделать вывод, что EWMA не пересекает верхнюю контрольную границу (ULS), а CUSUM+ пороговое значение h . Поэтому нестабильность процесса определяется снижением выхода КГ.

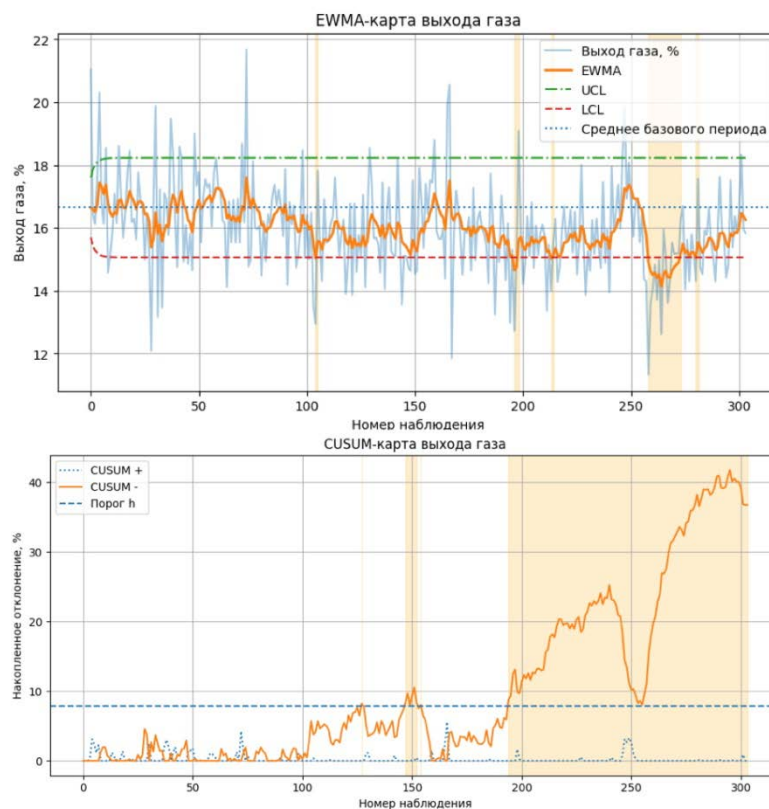


Рисунок 1 – Контрольные карты EWMA и CUSUM

Для определения признаков упрощенной модели был проведен статистический анализ различий между группами с использованием непараметрического критерия Манна-Уитни (табл. 1), не требующего предположения о нормальности распределения [2].

Таблица 1 – Критерий Манна-Уитни для признаков

Параметр	W	A	S	Vd	Vdaf	Y	Ro	Io	Ио
p-value	0,261	0,003	0,156	0	0	0	0	0	0,64

Статистический анализ признаков показал, что для A, Vd, Vdaf, Y, Ro и Io нулевая гипотеза об отсутствии различий в распределении была отклонена (при уровне значимости $\alpha = 0,005$). Таким образом, подтверждено наличие статистически значимых различий между значениями данных показателей в стабильном и нестабильном режимах работы. Следовательно, в упрощенной модели целесообразно использование этих 6 признаков.

После формирования переменной и выбора признаков упрощенной модели было проведено обучение логистических регрессий. Использование этого метода обусловлено простотой интерпретации, высокой скоростью обучения и

возможностью работы с небольшим количеством данных [3]. Ввиду отсутствия параметров EWMA выше ULS и CUSUM+ выше порога h , предложенные модели были обучены только на прогнозировании вероятности снижения КГ.

Перед обучением моделей данные были разделены на обучающую (70 %) и тестовую (30 %) выборки, а признаки приведены к единому масштабу с помощью применения метода Z-преобразования (стандартизация). Для оценки результатов прогнозирования на рисунках 2 и 3 представлены ROC-кривые и матрицы ошибок.

Уравнение базовой модели:

$$P(y) = \frac{1}{(1 + \exp(-(-0,96 + 0,25W + 0,16A - 0,64S - 1,44Vd - 1,63Vdaf - 0,43Y - 0,87Ro + 0,6)))} \quad (1)$$

Уравнение упрощенной модели:

$$P(y) = \frac{1}{(1 + \exp(-(-0,96 - 0,115W - 1,26A - 1,46S - 0,64Vd - 0,57Vdaf - 0,45Y)))} \quad (2)$$

Анализ коэффициентов при признаках показывает, что в упрощенную модель вошли только признаки с отрицательными коэффициентами. Это показывает, что увеличение данных признаков сводит к снижению вероятности возникновения нестабильного режима.

Кривая ROC (рис. 2) отображает зависимость доли истинноположительных результатов от доли ложноположительных при различных порогах классификации [4]. Площадь (AUC) базовой и упрощенной моделей составили 0,86 и 0,89 соответственно, что показывает хорошее качество прогноза ($AUC > 0,5$), а кривая упрощенной модели находится выше линии случайного угадывания, чем у базовой модели в диапазоне ложноположительных классификаций 0,1-0,3, что указывает на более точный прогноз этой модели.

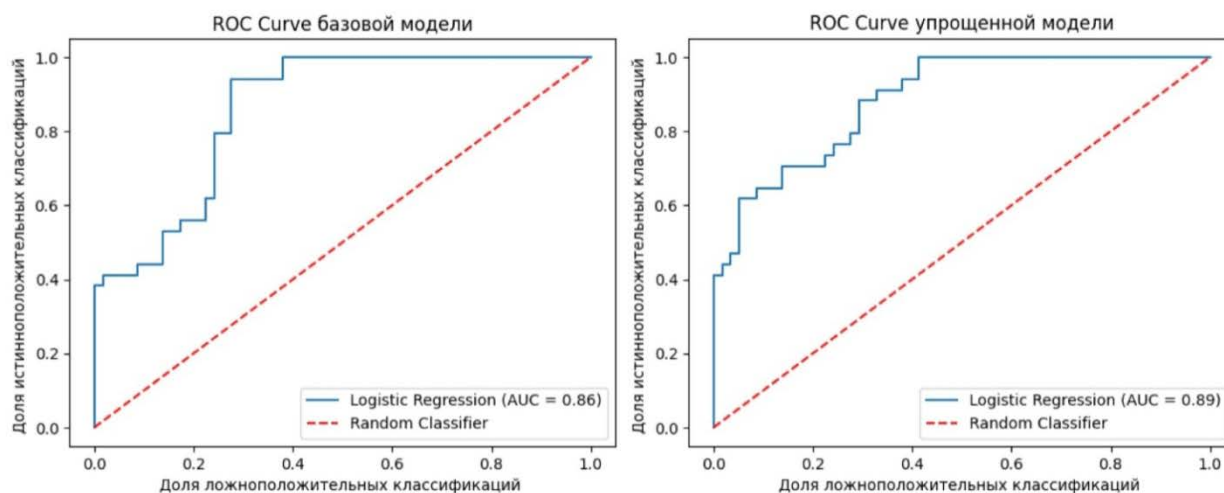


Рисунок 2 – ROC-кривые базовой и упрощенной моделей

Для того чтобы сравнить в чем разница прогнозирования у двух моделей были построены матрицы ошибок (рис. 3). Общая идея заключается в том, чтобы считать, сколько раз наблюдения класса 1 классифицируются как класс 0 и наоборот [4]. Согласно полученным результатам, базовая модель допустила 11 ошибок первого рода и 15 ошибок второго рода. Упрощенная модель совершила столько же ошибок первого рода, но также сделала на 5 ошибок меньше второго рода. Это означает, что упрощенная модель стала реже путать нестабильный режим со стабильным и точнее улавливает вероятность понижения выхода КГ.

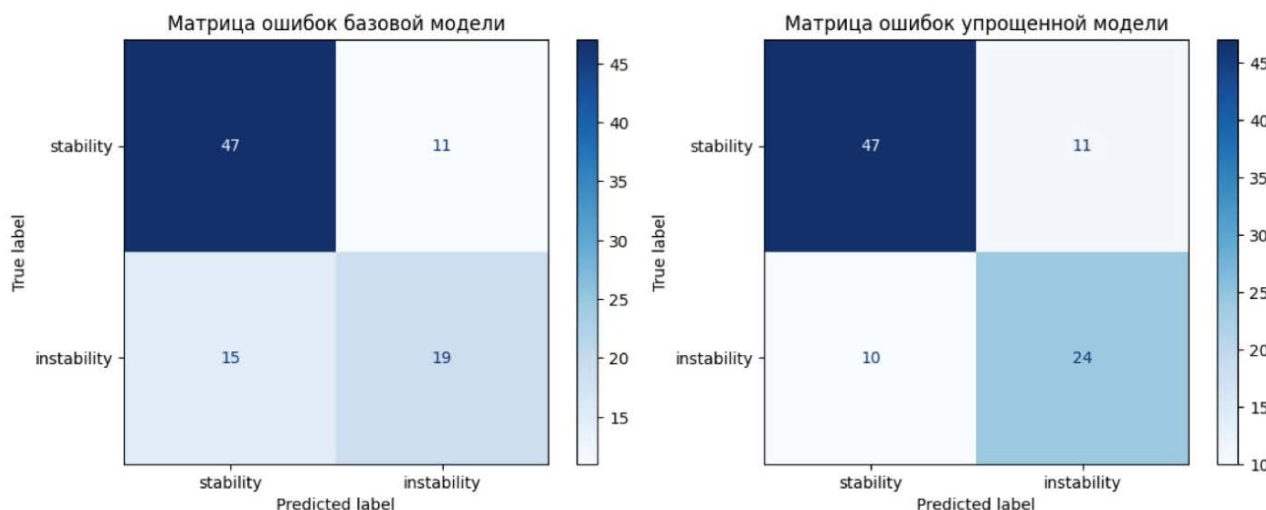


Рисунок 3 – Матрицы ошибок базовой и упрощенной моделей

Для построение контрольных карт, обработки данных, стандартизации признаков, построения моделей логистической регрессии, оценки их качества и визуализация результатов использовался язык программирования Python с применением библиотек pandas, NumPy, scipy и scikit-learn, matplotlib.

В результате работы были сделаны две модели, одна из которых обладает меньшим количеством признаков при этом не теряя качество прогноза. Модели демонстрируют возможность их использования для поддержки принятия решений на производстве.

Литература

1. Солонин, С. И. Метод контрольных карт : учебное пособие / С. И. Солонин. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. – 215 с.
2. Крохалев, В. Я. Статистика : учебное пособие / В. Я. Крохалев, С. А. Скопинов, В. А. Телешев ; ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России. – Екатеринбург : Изд-во УГМУ, 2018. – 114 с.
3. Hosmer, D. W. Applied Logistic Regression / D. W. Hosmer, S. Lemeshow, R. X. Sturdivant. – 3rd ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2013. – 528 p.
4. Géron, A. Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow / A. Géron. – 2nd ed. – Sebastopol, CA : O'Reilly Media, Inc., 2019. – 856 p.

КОМПОСТИРОВАНИЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД УТИЛИЗАЦИИ ДРЕВЕСНО-ЛИСТВЕННЫХ ОТХОДОВ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Рябков В.А., Башева Т.С.
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

Накопление опавшей листвы на городских территориях представляет собой серьёзную экологическую проблему, которая требует продуманных решений. Из-за санитарных требований оставлять листву на газонах не рекомендуется и, как следствие, возникают прецеденты ее сжигания с выбросом загрязняющих веществ в атмосферу. Вывоз на полигоны ТКО снижает загрязнение воздуха, но вызывает переполнение свалок и увеличивает финансовые и логистические затраты [1].

В условиях растущей урбанизации проблема обращения с твёрдыми коммунальными отходами обостряется. Ежегодно в городах образуется большой объём растительных отходов. Согласно Федеральному классификационному каталогу, листва относится к 5-му классу опасности и входит в категорию ТКО. При этом она является ценным органическим сырьём: при разложении образует гумус, обеспечивающий плодородие почв. Однако из-за несовершенства методов утилизации питательные вещества не возвращаются в экосистему, что нарушает биогеохимический круговорот. Оптимальной альтернативой выступает компостирование. Этот метод позволяет безопасно перерабатывать древесно-лиственные отходы в органическое удобрение, снижает экологическую нагрузку и способствует замкнутости круговорота биогенных элементов в урбоэкосистемах, что повышает устойчивость городской среды [2].

Цель: изучение метода компостирования как перспективного способа обращения с отходами листвы в условиях города.

Компостирование древесно-лиственных отходов — востребованный метод утилизации растительных остатков, получивший распространение во многих странах Мира. По данным на 2024-2025 годы, глобальный рынок органического компоста оценивается в 6,4–6,96 млрд долларов США. Ежегодно в мире производится около 10 млн тонн компоста при средней цене 618 долларов за тонну. По прогнозам, к 2032 году рынок достигнет 11,33 млрд долларов, а среднегодовой темп роста составит 7,2%. [1]. Лидеры отрасли — страны Евросоюза, где законодательство стимулирует отдельный сбор органики. В Германии действует 868 компостных заводов, перерабатывающих 7,5 млн тонн отходов в год. В Северной Америке насчитывается более 2500 установок, в Китае также активно развивается инфраструктура компостирования [1].

В России рынок компоста находится в зачаточном состоянии: только с 2019 года началось создание современных объектов в составе комплексов по обработке ТКО. В 2020 году объём рынка составил 1,5 млрд рублей (400 тыс. тонн субстрата), при этом доля компоста из собственного сырья не превышала

20% [1].

В городской среде компостирование сокращает объёмы древесно-лиственных отходов на полигонах ТКО и даёт ценный продукт для озеленения. Компост — это натуральное удобрение, которое образуется в результате биохимического разложения органических материалов (листвы, веток, пищевых растительных отходов). Ключевую роль в процессе компостирования играют микроорганизмы, в том числе термофильные бактерии. Они активизируются при повышении температуры внутри компостной кучи и ускоряют переработку сырья в питательное вещество. При этом количественная оценка доступного сырья подтверждает практическую значимость метода. Масса сухого листового опада зависит от пород деревьев, времени года, плотности застройки и типа зелёных насаждений. Ориентировочные значения в пересчёте на сухое вещество: для новой застройки (молодые парки, дворы) — 0,1–0,3 т/га; для старых парков, лесопарков и благоустроенных зон — 0,5–1,2 т/га; для плотно засаженных лесных массивов (например, дубравы, березовые колки) — до 3–4 т/га, однако в городской среде эти значения ниже из-за уборки, асфальтирования и разреженности посадок [3].

Основные условия внедрения стационарного комплекса для компостирования ДЛО — специализированные площадки, оборудование (дробилки, системы аэрации, увлажнения, просеивания) и отлаженная логистика. Несмотря на капитальные затраты, потенциал метода оправдывает вложения. На рисунке 1 представлена структура технологического процесса компостирования древесно-лиственных отходов.



Рисунок 1 — Структура технологического процесса компостирования ДЛО

Процесс производства компоста начинается со сбора растительных и древесных остатков, которые затем подвергаются измельчению для ускорения разложения. После измельчения материалы смешиваются и при необходимости в смесь вносятся добавки (ускорители компостирования или азотсодержащие компоненты). Далее формируется компостный бурт в виде объёмной кучи из подготовленного сырья. Бурт увлажняется для поддержания оптимальной

влажности, необходимой для активности микроорганизмов. Параллельно проводится аэрация, а именно перемешивание буртов, что обеспечивает доступ кислорода и предотвращает анаэробные процессы. В ходе созревания компоста регулярно измеряются параметры (температура, влажность, pH), чтобы контролировать ход ферментации. После завершения созревания компост просеивается для отделения крупных неразложившихся фрагментов, затем проходит этап отсева — удаления мелких примесей и получения однородной массы. В итоге получается готовый компост, пригодный для использования в сельском хозяйстве или садоводстве.

Описанная выше технологическая схема отражает последовательность операций с самим субстратом. Однако при промышленном масштабировании процесса, особенно на открытых площадках, возникает необходимость в дополнительных инженерных решениях, направленных на защиту окружающей среды. Одним из ключевых решений является компостирование ДЛО в буртах и в изолированной системе (рисунок 2).

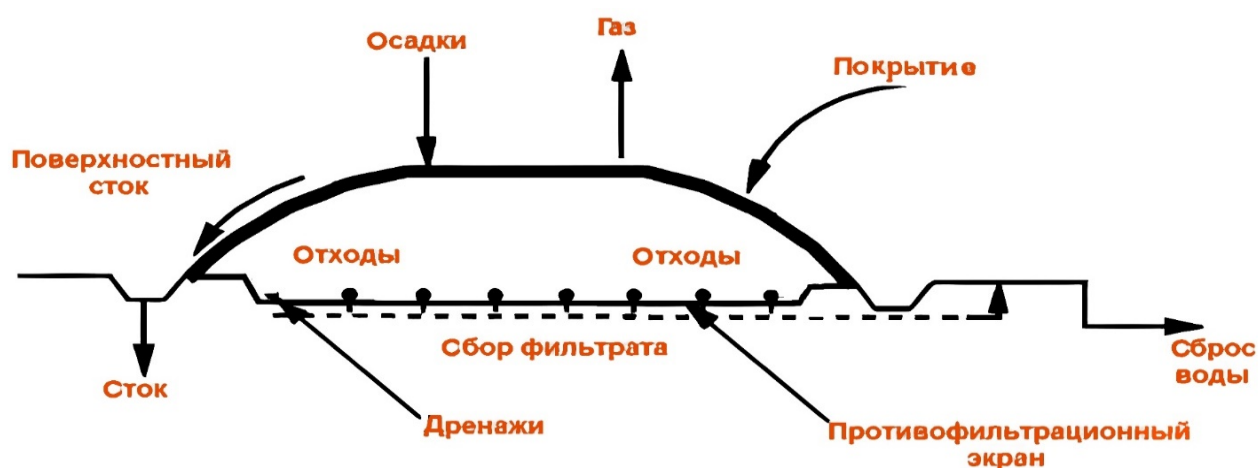


Рисунок 2 — Схема компостирования ДЛО в буртах

Схема компостирования древесно-лиственных отходов представляет собой изолированную систему, где отходы размещаются под защитным покрытием с системами отвода газов и жидкостей. Конструкция включает противофльтрационный экран для защиты почвы и дренажную систему для сбора и утилизации образующихся при разложении отходов фильтрата и поверхностных стоков.

Процесс начинается с укладки подготовленных древесно-лиственных остатков, предварительно измельченных до оптимального размера частиц 0,3–5,0 см, на противофльтрационный экран, после чего сформированный бурт (размером не более 1,5 м в высоту и 2,5 м в ширину) накрывается защитным покрытием, которое предотвращает распространение газов и запахов, а также минимизирует поступление осадков.

Для успешного протекания процесса компостирования необходимо соблюдение ряда параметров. В ходе активной фазы разложения

поддерживается влажность субстрата на уровне 50–60 %, содержание кислорода в газовой фазе — 16–18,5 %, а объем газовой фазы должен составлять не менее 30 %. Температура внутри бурта контролируется и не должна превышать 65 °С в термофильной стадии. Показатель pH изменяется динамически: от 5,6–6,0 в конце мезофильной стадии до 9,0 в термофильной, а для зрелого компоста оптимальным считается нейтральный диапазон 6,8–7,0 [2].

В ходе компостирования из отходов выделяется биогаз, который отводится через специальные газоотводящие каналы. В отличие от традиционных схем, где биогаз сжигается или рассеивается, предлагается, после очистки от сероводорода и углекислоты, возвращать его обратно в бурт. Это позволит создать управляемый режим с регулируемым окислительно-восстановительным потенциалом, благодаря чему становится возможным селективно стимулировать термофильные бактерии и ускорять созревание компоста.

Образующийся в процессе компостирования фильтрат, собирается дренажной системой. Вместо простого рециклинга вся аммонийная фракция предварительно обрабатывается в отдельном анаммокс-биореакторе, что снижает токсичность жидкости и одновременно генерирует молекулярный азот. Очищенный фильтрат затем используется для повторного увлажнения буртов.

Ключевым элементом новизны является применение машинного обучения для предиктивного контроля влажности. На основе данных о температуре, pH и составе биогаза система самостоятельно определяет момент и объём возврата фильтрата, что исключает возникновение дисбаланса между аэробными и анаэробными зонами внутри бурта.

Таким образом, предлагаемая модификация превращает стандартную изолированную систему компостирования в интеллектуальный замкнутый цикл с минимальным воздействием на окружающую среду, где каждый из потоков (биогаз, фильтрат, поверхностные стоки и тепло) не просто отводится, а активно рециркулирует с трансформацией на последующих технологических этапах.

Для перехода от исходного сырья к готовому компосту нельзя указать единый точный коэффициент — он всегда зависит от условий компостирования. Также это связано и с изменчивостью влажности опавшей листвы. Однако по практическим данным количество зрелого компоста составляет около 1/2 от исходного объёма лиственной массы. С учётом естественной убыли массы 30–50 % из 10 тонн свежего опада получается примерно 6 тонн компоста. Следовательно, с 1 гектара городской территории (при нормативах 1,2 т/га в благоустроенных зонах и 3 т/га в лесопарках) можно получить от 0,6 до 1,8 тонны органического удобрения для озеленения и сельского хозяйства [3].

Изученный в статье метод компостирования древесно-лиственных отходов являются эффективными для переработки отходов городской листвы. Внедрение данной технологии позволяет решить комплекс проблем: сократить нагрузку на полигоны ТКО, предотвратить загрязнение почвы и грунтовых вод,

получить ценный субстрат для городского озеленения. Ключевым преимуществом метода является возможность создания замкнутого цикла переработки с контролем всех технологических параметров.

Литература:

1. Башевая, Т.С. Опадающая листва как социальная и экологическая проблема современного города / Т. С. Башевая, В. А. Рябков // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве: Сборник материалов II Международной научной конференции, Макеевка, 15 февраля 2024 года. – Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2024. – С. 283-286.

2. Зольникова, П. Н. Компостирование органической фракции твёрдых коммунальных отходов / П. Н. Зольникова // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: Сборник научных трудов XV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Новокузнецк, 07–25 апреля 2025 года. – Новокузнецк: Кемеровский государственный университет, 2025. – С. 490-494.

3. Алабужев, Г. А. Оценка современных методов компостирования твёрдых коммунальных отходов / Г. А. Алабужев, А. И. Мазур // Наука и инновации - современные концепции: Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 30 ноября 2023 года. Том 1. – Москва: ООО "Инфинити", 2023. – С. 166-172.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Селюч Ю.В., Радионенко В.Н.
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

Автотранспортные предприятия (АТП) являются значимыми источниками комплексного воздействия на окружающую среду, особенно в условиях малых поселений и северных территорий. В Архангельской области, характеризующейся низкой самоочищающей способностью экосистем, длительным периодом восстановления природных компонентов и особыми климатическими условиями, проблема экологической безопасности функционирования АТП приобретает особую остроту.

В связи с этим возникает необходимость в проведении детальной экологической оценки деятельности конкретного предприятия с разработкой научно обоснованных рекомендаций по снижению негативного воздействия.

Исследуемым предприятием является Кулойский участок автотранспортного предприятия ООО «Трансавтоснаб», расположенный в посёлке Кулой Архангельской области. Автотранспорт находящийся на балансе предприятия расположен в закрытых отапливаемых и неотапливаемых боксах и на территории открытых стоянок. Общее количество автотранспорта – 43 автомобиля (легковой, грузовой автотранспорт и автопогрузчики). Используемое топливо – бензин, дизель.

Целью данного исследования является комплексная оценка экологического воздействия автотранспортного предприятия на окружающую среду посёлка Кулой Архангельской области и разработка системы природоохранных мероприятий, направленных на снижение негативного влияния на окружающую среду и здоровье населения.

В рамках исследования был произведён расчёт величины выбросов загрязняющих веществ от предприятия ООО «Трансавтоснаб», который показал что общее количество выбросов загрязняющих веществ оставил – 2,653 т/год, 3,929 г/с. Основными загрязняющими веществами, влияющими на качество атмосферного воздуха являются: оксид углерода, оксиды азота, оксиды серы, керосин, сажа.

Расчёт загрязнения атмосферы выполнен для всех веществ и соответствующих групп суммаций по всем источникам выбросов в соответствии с утвержденной методикой, с использованием унифицированной программы расчёта загрязнения атмосферы УПРЗА «ЭКО центр».

Количество загрязняющих веществ в расчете – 13 (в том числе твердых - 5; жидких и газообразных - 8), групп суммации – 2. Результаты расчета рассеивания (мажоранта) представлена на рисунке 1. Рисунок выполнен в масштабе 1:5000.

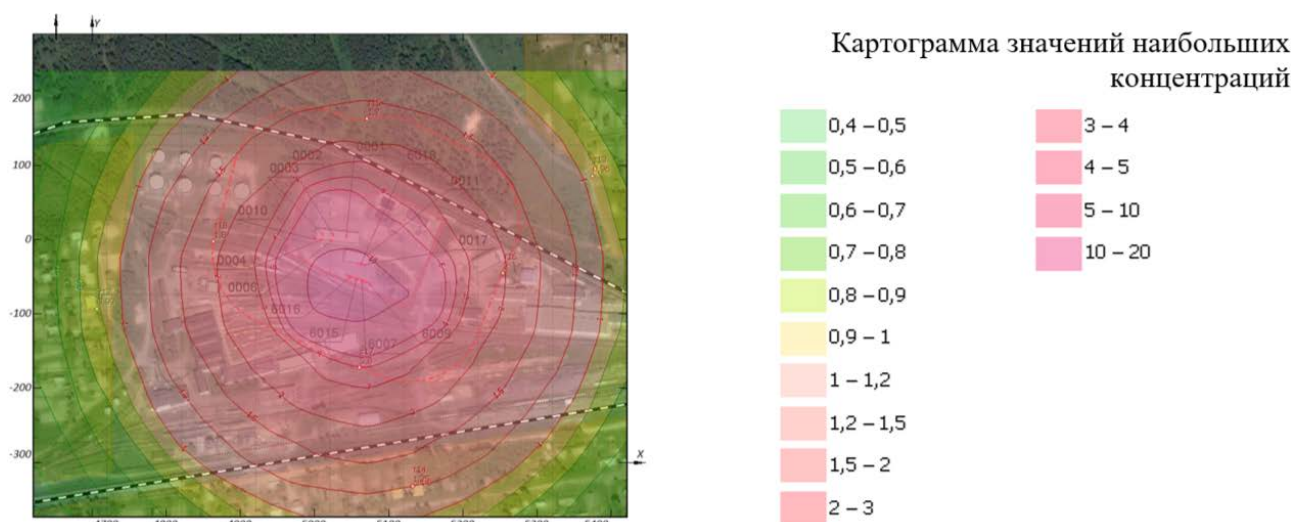


Рисунок 1 – Мажорантный расчет рассеивания по всем веществам

Проведенный расчет показал превышение ПДК по: диоксиду азота в 3,8 ПДК, оксиду углерода в 1,85 ПДК, а также по группе суммации – диоксид азота и диоксид серы в 3,8 ПДК.

Автотранспортное предприятие является источником постоянного и импульсного шума, создающего дополнительную нагрузку на окружающую территорию. Основными источниками шума на предприятии являются: работа двигателей автотранспорта, ремонтные работы, системы вентиляции и компрессорное оборудование. Проведенное исследование по шумовому загрязнению от предприятия показало, что превышение нормативных показателей по шуму составит до 17 дБА.

Влияние АТП на гидросферу включает: ливневые сточные воды с территории стоянок и проездов, содержащие нефтепродукты, взвешенные вещества, производственные стоки от мойки автомобилей с высокой концентрацией нефтепродуктов, ПАВ, тяжёлых металлов, хозяйственно-бытовые стоки от персонала.

Известно, что в процессе эксплуатации автотранспортного предприятия образуются отходы различных классов опасности. Анализ объемов образующихся отходов (по данным инвентаризации предприятия) представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Объемы отходов автотранспортного предприятия

Наименование отхода	Класс опасности	Количество, т/год
Отработанные моторные и трансмиссионные масла	III	2,8
Отработанные фильтры (масляные, воздушные, топливные)	IV	0,45
Отработанные аккумуляторы (свинец, электролит)	II	1,2
Отработанные шины (покрышки, камеры)	IV	3,5
Лом чёрных металлов	V	1,8

Обтирочный материал, загрязнённый маслами	III	0,6
ТКО от персонала	V	4,2
Смет с территории (содержит нефтепродукты, реагенты)	IV	2,1

Проблемными аспектами в области обращения с отходами на предприятии можно выделить накопление отходов, отсутствие системы раздельного сбора, недостаточная герметизация площадок временного хранения отходов. Общее количество образованных отходов предприятием за год составляет 16,65 тонн.

Исследование данных химического состава почв возле автотранспортных предприятий показывает загрязнение следующими веществами: нефтепродукты, свинец, цинк, медь, никель и др.

Полученные результаты комплексной экологической оценки однозначно подтверждают наличие существенной техногенной нагрузки на окружающую среду и необходимость разработки природоохранных мероприятий (рис 2).

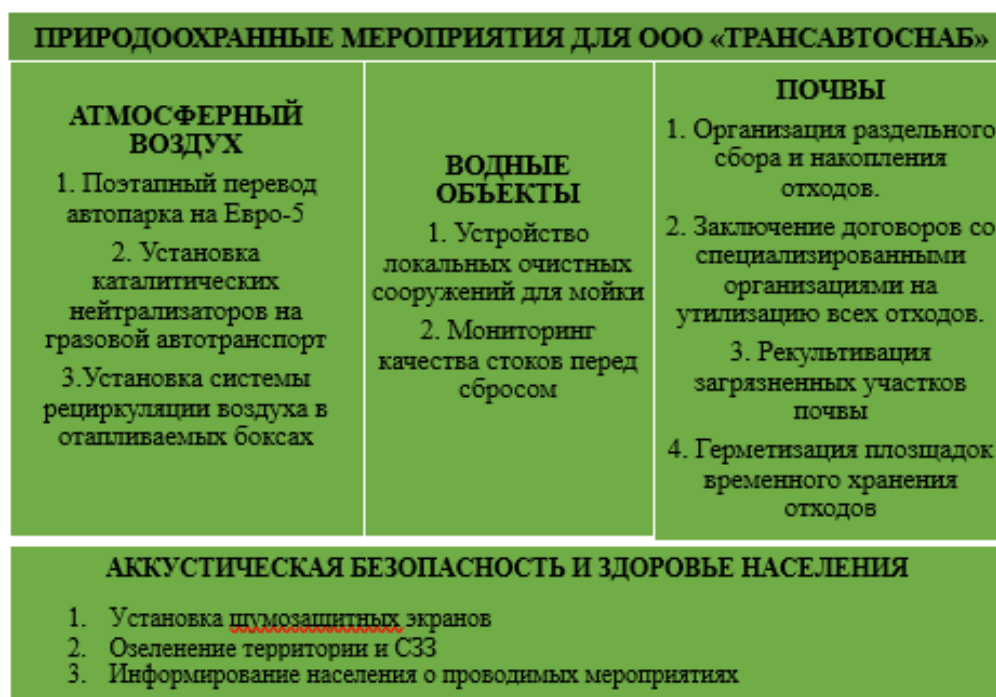


Рисунок 2 – Схема комплексных природоохранных мероприятий

Проведённое исследование подтвердило наличие существенного негативного воздействия исследуемого предприятия на окружающую среду и здоровье населения посёлка. Разработанный комплекс природоохранных мероприятий обеспечивает системное снижение всех видов воздействия

Литература:

1 Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: утверждены приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273. – Москва, 2017 г. – Текст: непосредственный

ВОЗМОЖНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ПЫЛИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Сырых А.А., Трошина Е.А., Горбатко С.В.
Донецкий национальный технический университет

Образование пыли является основной проблемой в производстве цемента, а регенерация пыли - экономически необходимой.

В одном из законов Вернадского говорится о биохимическом единстве биосферы и все загрязнения, поступающие первоначально в атмосферу, гидросферу или литосферу, в конечном счете, оказываются распространенным в каждой из них. Таким образом, химические соединения являются составляющими промежуточных выбросов и претерпевают в любой из составляющих биосферы изменения физико-химического характера.

Одним из таких негативных преобразований в экосистеме является загрязнение атмосферного воздуха отходами цементного производства.

Предприятиями цементной промышленности в окружающую среду выделяется ежегодно 27 млн. тонн пыли. На их долю приходится 2/3 промышленных выбросов твердых веществ и 44 % газообразных.

Экономический эффект, получаемый при повторном использовании уловленной пыли, недостаточен, чтобы полностью покрыть стоимость пылеулавливающего оборудования. Однако удаление пыли необходимо для выполнения требований законодательства по охране окружающей среды и для предотвращения загрязнения близлежащей местности. Осуществление этого процесса является не простой проблемой.

Цемент не является природным материалом. Его изготовление - процесс дорогостоящий и энергоемкий, однако результат стоит того - на выходе получают один из самых популярных строительных материалов, который используется как самостоятельно, так и в качестве составляющего компонента других строительных материалов (бетона и железобетона). Цементные заводы, как правило, находятся вблизи от места добычи сырьевых материалов для производства цемента.

Производство цемента включает две ступени: первая - получение клинкера, вторая - доведение клинкера до порошкообразного состояния с добавлением к нему гипса или других добавок. Первый этап самый дорогостоящий, именно на него приходится большая часть себестоимости цемента.

Содержание фракции пыли менее 10 мкм по мере прохождения материала в процессе технологической обработки возрастает от 10 до 75 %. Наиболее мелкая пыль образуется при обжиге сырьевой шихты во вращающихся печах.

Попытки использования цементной пыли путем ее возвращения на стадию обжига в том виде, в каком она была уловлена, нельзя признать успешными по двум основным причинам. Эта пыль настолько мелкая, что значительная часть ее снова выносится отходящими газами еще до поступления на стадию

цементообразования. Помимо больших потерь это приводит также к большому увеличению нагрузки на трубчатую пылеулавливающую систему.

Еще более существенной причиной является присутствие в пыли значительных количеств сульфатов и хлоридов щелочных металлов, которые не позволяют получать цемент достаточно хорошего качества. Поскольку требования охраны окружающей среды становятся все более жесткими, а пылеулавливающее оборудование все более совершенным, то происходит улавливание все более мелких частиц пыли. Чем меньше размеры частиц, тем, как правило, выше содержание щелочных элементов в пыли. Таким образом, упомянутая проблема качества становится все более серьезной.

Известные способы, предназначенные для изменения физического состояния и уменьшения содержания щелочных элементов в цементной пыли, не находят практического применения по экономическим или другим причинам.

Усовершенствованный метод, относящийся к экономичному способу переработки цементной обжиговой пыли с любым размером частиц и содержанием щелочных металлов был предложен А.Т. Мак-Кордом. Пыли придается, такое физическое состояние и химический состав, который позволяет повторно использовать ее для изготовления цемента. При этом хлориды щелочных металлов могут быть достаточно легко выделены в кристаллическом виде с хорошей степенью чистоты.

Усовершенствованный процесс включает:

- 1) обработку цементной обжиговой пыли водным раствором хлорида калия при повышенной температуре;
- 2) добавление к полученной взвеси цементной пыли небольших количеств масла и жирных кислот, хлопьеобразование и комкование твердой фазы;
- 3) удаление хлопьев и комков твердого вещества из жидкой фазы;
- 4) легкую промывку твердого материала для дальнейшего снижения содержания щелочных металлов;
- 5) охлаждение раствора для кристаллизации хлорида калия;
- 6) отделение полученного кристаллического вещества.

Остаточный раствор после удаления основного количества кристаллического хлорида калия все еще насыщен солью и после нагревания может быть направлен на стадии обработки новых порций цементной пыли.

В настоящее время на большинстве предприятий в системах пылеулавливания используются электрофильтры, установленные двадцать и более лет назад и обеспечивающие степень очистки 95-98 % или 300-800 мг/м³ пыли на выходе. Многие предприятия вынуждены решать сегодня вопрос замены морально и физически устаревших электрофильтров и ориентируются снова на электрофильтры, как привычное оборудование. Однако сегодня только лучшие зарубежные электрофильтры, имеющие 5-7 полей, обеспечивают остаточную запыленность на уровне 50-100 мг/м³, при этом габариты таких фильтров значительно больше существующих. К существенным недостаткам электрофильтров относятся сложность конструкции, невозможность

стабильной работы в условиях изменяющегося химического и физического состава рабочей среды, остаточная электризация уловленных частиц пыли, которая часто не позволяет вернуть ее в производство. Как техническая система электрофильтр достиг своего граничного развития и не может дальше следовать за ужесточающимися требованиями по количеству выбросов.

В настоящее время печную пыль начали с успехом использовать как добавку к сырьевой массе при изготовлении силикатного кирпича.

Пыль электрофильтров при производстве цемента также используют в качестве удобрений для известкования кислых почв в сельском хозяйстве.

Пыль, уловленную системами очистки, используют для производства окрашенного медицинского стекла и получения на листовом стекле тонких теплозащитных пленок с коэффициентом поглощения в ИК-диапазоне спектра 39-25 %.

В настоящее время продолжают работы по усовершенствованию существующих систем пылеулавливания, и расширяется область применения цементной пыли в различных отраслях промышленного производства.

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. Хабарова Е. В. «Основы рационального природопользования». Учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 319 с.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ВДУВАНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Падалка А.В., Падалка В.П., Кочура В.В.
Донецкий национальный технический университет

Одним из важнейших аспектов ресурсосбережения в доменном производстве является снижение расхода кокса. Это достигается путем замены кокса дополнительными видами топлив. Наибольшее применение в доменной плавке получило пылеугольное топливо (ПУТ) [1-4]. Данная технология позволяет значительно снизить расход кокса, полностью вывести из дутья природный газ и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

На Енакиевском металлургическом заводе в 2016 г. был введен в эксплуатацию промышленный комплекс для приготовления и вдувания ПУТ в горн доменных печей №3 и №5.

На существующей эстакаде доменного цеха имеются 6 приемных бункеров по 50 м³, на которых одновременно могут разгружаться 2 вагона с углем (рис. 1). Из приемных бункеров ленточными дозаторами уголь подается на ленточный конвейер, далее на вибрационный грохот, где отсеивается класс крупности + 70 мм. Подгрохотный продукт подается на ленточный конвейер и затем в пылеприготовительное отделение (ППО), а надгрохотный - на щековую дробилку, а затем в ППО.

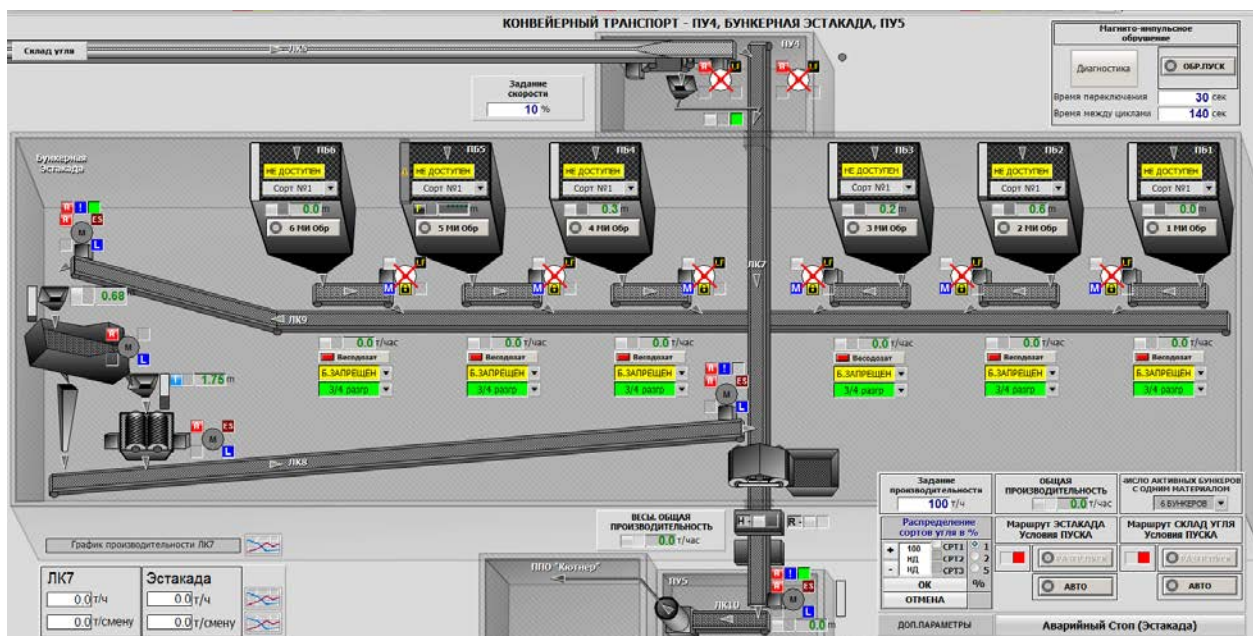


Рисунок 1 – Приемные бункера угля на эстакаде доменного цеха с технологическим оборудованием

ППО предназначено для приготовления из поступающих углей ПУТ, пригодного для вдувания в доменные печи. Оно состоит из двух симметричных контуров помола, каждый из которых имеет возможность подать ПУТ в

распределительное устройство как ДП №3, так и ДП №5 (рис. 2).

Из бункера угля каждого из контуров помола уголь скребковым конвейером загружается в вертикальную валковую мельницу фирмы LOESCHE производительностью 52,5 т/час.

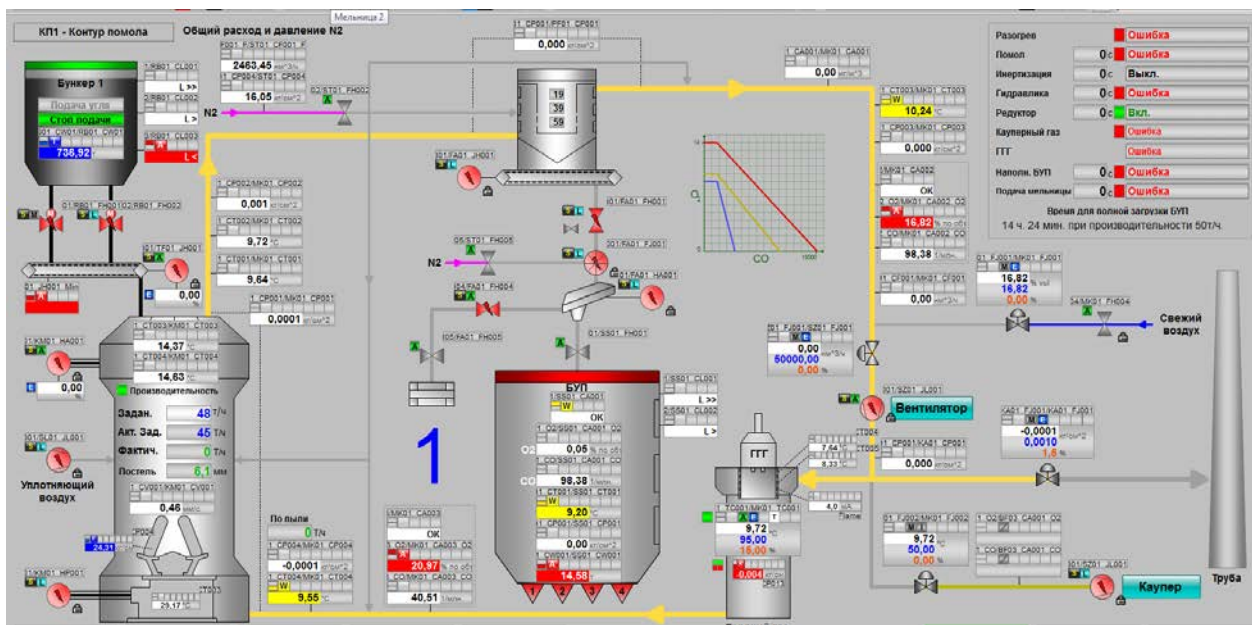


Рисунок 2 – Контур помола №1 ППО

Помол угля в мельнице осуществляется в инертной среде, что достигается подачей в нее горячих газов с низким содержанием кислорода, которые вырабатываются в газогенераторе при сжигании доменного газа до $8000 \text{ м}^3/\text{час}$. С целью сокращения расхода доменного газа имеется возможность подать в газогенератор кауперный газ от водухонагревателей ДП №3 с температурой $\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$. В этом случае можно снизить расход доменного газа до $4000 \text{ м}^3/\text{час}$.

Измельченный до необходимого класса крупности уголь газовым потоком увлекается в верхнюю часть мельницы, проходит динамический сепаратор и по газопроводам попадает в рукавный фильтр, состоящий из 2160 рукавов с вертикальной компоновкой. Импульсная очистка рукавов производится азотом с давлением 6 бар продолжительностью около 0,2 сек. После рукавного фильтра газовый поток имеет запыленность не более 20 мг/м³ и направляется на газогенератор. Часть газов сбрасывается в дымовую трубу. Циркуляцию газов по контуру помола обеспечивает процесс-вентилятор с мощностью привода 600 кВт. Для обеспечения содержания в газовом потоке содержания O₂ в количестве не более 10 %, в контур помола угля подается N₂ с максимальным расходом 4500 м³/час.

Уловленная угольная пыль накапливается в бункере рукавного фильтра, откуда скребковым конвейером по двум трактам подается на два ячейковых питателя, а затем на два вибрационных грохота с ячейкой сита 1 мм. Надгрохотный продукт попадает в контейнер для отходов, а подгрохотный – в бункер угольной пыли (БУП). Емкость бункера угольной пыли – 1200 м³. Из потока ПУТ поступающего в БУП отбирается проба, которая должна

соответствовать следующим требованиям:

- размер частиц: 80 % вес. < 90 микрон;
- размер частиц: 99,95 % вес. < 1 мм;
- влажность: макс. 1,5 % вес.

Из БУП ПУТ подается в три пневмонасоса, каждый имеет возможность по транспортным магистралям доставлять ПУТ к распределителям ДП №3 и ДП №5.

От распределителей по индивидуальным трубопроводам ПУТ транспортируется к доменным печам (рис.3). Каждый транспортный трубопровод подключается и отключается индивидуально, не оказывая влияния на транспортировку в других транспортных трубопроводах.

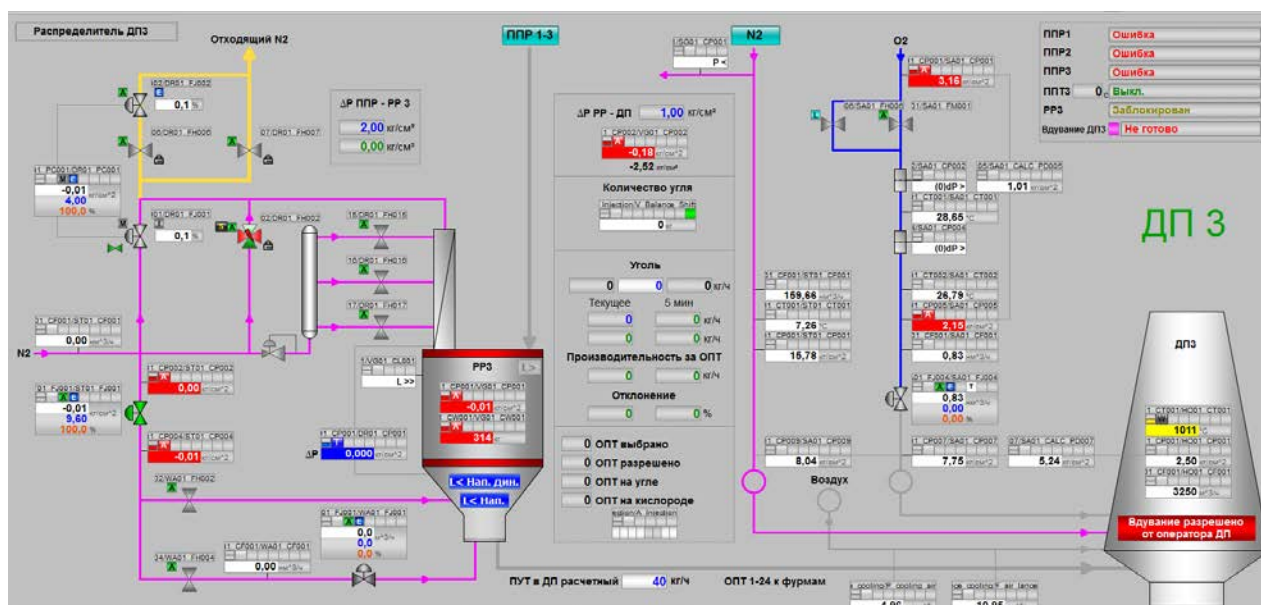


Рисунок 3 – Схема транспортировки ПУТ от распределителя к ДП №3

Расчет показывает, что при замене измельченным углем 1 млн. т кокса (расход угля - 200 кг/т чугуна, коэффициент замены - 0,85 кг/кг) выброс в атмосферу вредных веществ за счет сокращения производства кокса уменьшается на 7094т. Выброс вредных веществ с недоочищенными промышленными стоками в водные бассейны уменьшается на 250-1020 т, в том числе: взвешенных веществ -120-240 т, аммония азотистого – 120-720 т, масло – 6-24 т, пиридиновых оснований – 3-14 т, фенолов - 0,3-0,4 т, родонидов -0,6-3,0 т, цианидов - 0,2-90 т.

В то же время производство 1 млн. т ПУТ сопровождается на один - два порядка меньшим выбросом в атмосферу вредных веществ: угольной пыли - 32 т; оксида углерода - 93,6;-оксида азота -37,6; сернистого ангидрида - 53,0 т, что при замене части кокса ПУТ определяет значительное уменьшение загрязнения окружающей среды вредными выбросами.

В связи с уменьшением потребления кокса в доменном производстве, общее снижение вредных выбросов в атмосферу существенно сокращается (табл.1).

Таблица 1 – Снижение вредных выбросов в атмосферу при вдувании ПУТ

Вредные вещества	Увеличение вредных выбросов в доменном производстве, т	Снижение выбросов в коксохимическом производстве, т	Общее снижение выбросов, т
H ₂ S	-	307,5	307,5
SO ₂	5,1	139,4	134,3
CO	8,7	53,7	45,0
аммиак	-	36,4	36,4
угольная пыль	2,8	326,2	323,4
NO _x	3,7	19,2	15,5
синильная кислота	-	1,3	1,3
фенол	-	11,4	11,4
Итого	20,3	895,1	874,8

Таким образом, технология доменной плавки с заменой кокса ПУТ позволяет не только снизить себестоимость чугуна, сократить использование кокса и природного газа, но и значительно уменьшить количество вредных выбросов в окружающую среду.

Литература:

1. Курунов, И.Ф. Современное состояние доменного производства в Китае, Японии, Южной Корее, Западной Европе, Северной и Южной Америке / И.Ф. Курунов // *Металлург.* – 2015. – № 7. – С. 12-22.
2. Ярошевский, С.Л. Эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна / С. Л. Ярошевский, В. В. Кочура, А. М. Кузнецов и др. // *Металл и литье Украины.* – 2018. – № 9-10. – С. 5-19.
3. Kexin, J. Operation characteristic of super-large blast furnace slag in China / J. Kexin, Z. Jianliang, C. Chunlin, L. Zhengjian and J. Xi // *ISI International.* – 2017. – Vol. 57. – No. 6. – pp. 983-988.
4. Production and technology of iron and steel in Japan during 2022 // *ISI International.* – 2023. – Vol. 63. – No. 6. – pp. 951-969.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ

Помазан Н.С., Пильгук С.В.

Донецкий национальный технический университет

Рентгенофлуоресцентный анализ является экспрессным, точным (с точностью 0,001%) и во многих случаях неразрушающим методом.

Рентгенофлуоресцентный спектрометр Genius IF фирмы Xenometrix может быть эффективно использован в учебном процессе технических вузов для обучения студентов методам элементного анализа, проведения лабораторных работ и выполнения научно-исследовательских проектов. Такое оборудование позволяет демонстрировать суть энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (ЭД-РФА), осваивать практические навыки работы с современным аналитическим оборудованием и решать прикладные задачи в различных областях науки и техники.

В РФА-спектрометрах чаще всего в качестве источников излучения используются рентгеновские трубки (рис. 1). Взаимодействуя с элементом образца, рентгеновское излучение частично поглощается и частично рассеивается.

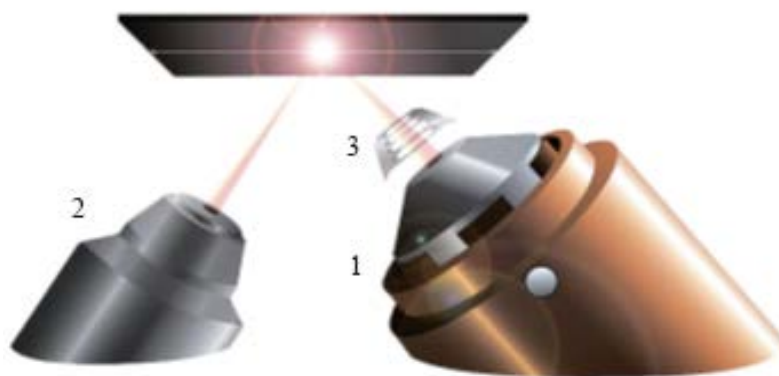


Рис. 1 – Принцип работы рентгенофлуоресцентного анализа:

1 – рентгеновская трубка; 2 – энергодисперсионный детектор;
3 – набор фильтров

Поглощенный фотон выбивает из внутренней электронной оболочки атома электрон, а на освободившееся место переходит электрон с более высокого энергетического уровня, испуская фотон характеристического излучения, свойственного конкретному химическому элементу (рис. 2). Кванты высокоэнергетического излучения, попадая на энергодисперсионный детектор (см. рис. 1), вызывают в нем пропорциональные их энергиям короткие импульсы напряжения. Эти импульсы затем оцифровываются и суммируются в спектр с помощью многоканального анализатора.

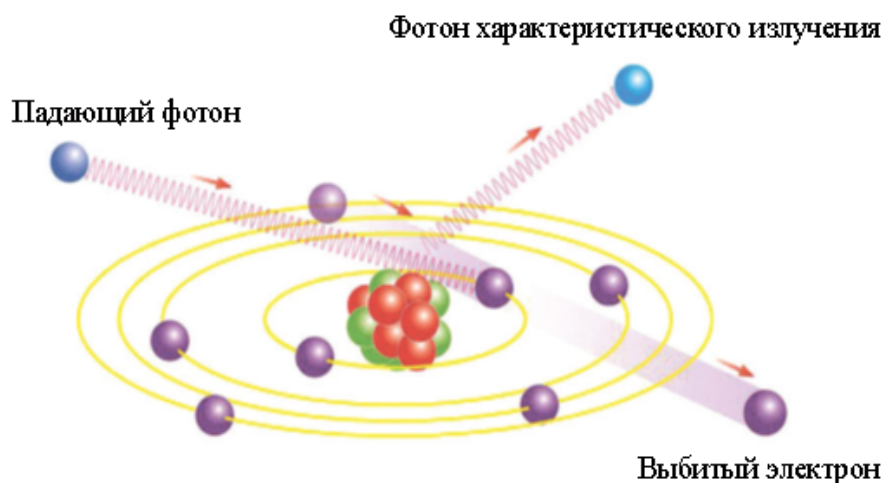


Рис. 2 – Возникновение характеристического излучения

Чувствительность определения легких элементов (например, *Al*, *Si*, *S*, *P*) может быть увеличена за счет удаления воздуха из камеры для образцов (вакуумированием или продувкой инертным газом). Также представленный прибор оборудован специальными фильтрами, которые размещаются на пути рентгеновского пучка, между рентгеновской трубкой и образцом. Фильтр поглощает часть излучения в определенном небольшом спектральном интервале, понизив фон там, где расположены пики интересующих элементов.

Для повышения эффективности работы детектора применяют вторичные мишени. Использование набора вторичных мишеней позволяет значительно улучшить эффективность работы детектора, сохраняя низкий фоновый сигнал во всем диапазоне спектра [1, 2]. Вторичная мишень переизлучает спектр трубки в виде узкой характеристической линии.

Нами было проведено исследование образцов Стали 10пс с использованием различных вторичных мишеней в воздушной среде и в вакууме. Некоторые результаты приведены на рис.3-5.

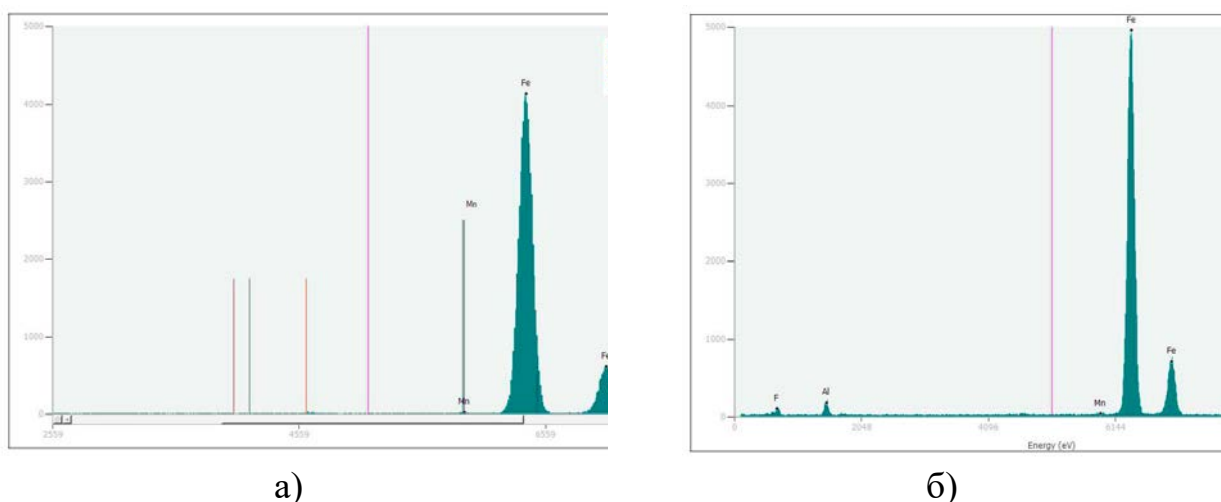
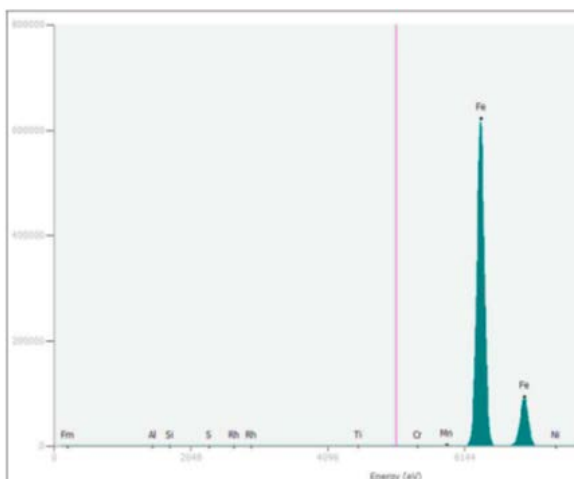
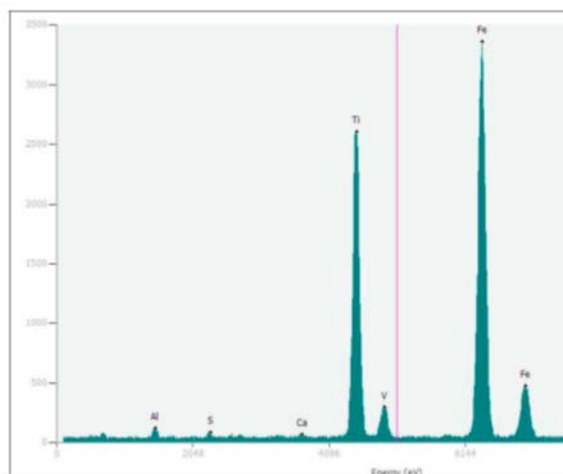


Рис.3 – Спектр с вторичной мишенью *Si* (атомный номер $z = 14$) в воздушной среде (а) и в вакууме (б)

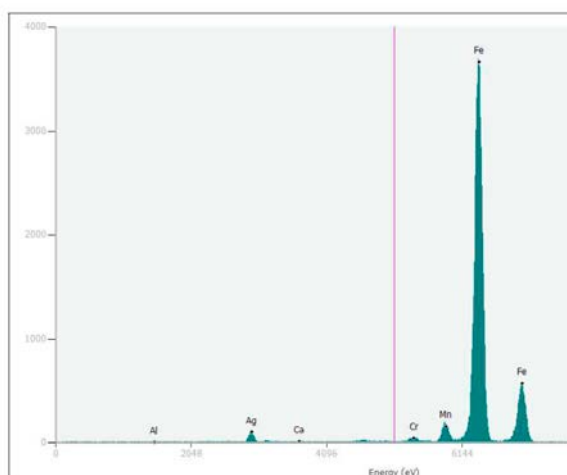


а)

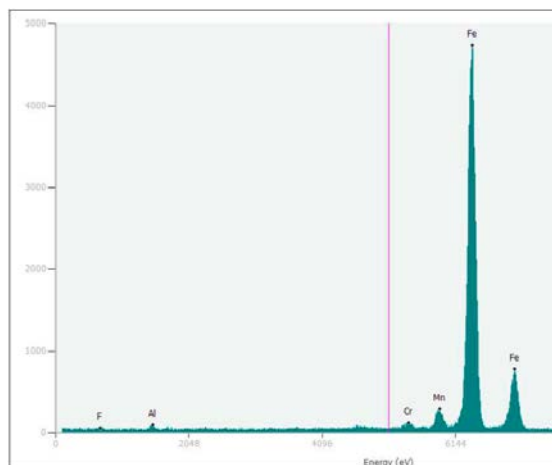


б)

Рис.4 – Спектр с вторичной мишенью *Ti* ($z = 22$)
в воздушной среде (а) и в вакууме (б)



а)



б)

Рис.5 – Спектр с вторичной мишенью *Fe* ($z = 26$)
в воздушной среде (а) и в вакууме (б)

Результаты экспериментов представлены в таблице.

Таблица. Число импульсов при различных вторичных мишенях

Элемент	Число импульсов					
	Мишень <i>Si</i>		Мишень <i>Ti</i>		Мишень <i>Fe</i>	
	воздух	вакуум	воздух	вакуум	воздух	вакуум
<i>Al</i> ($z=13$)	-	189	6	129	5	91
<i>Si</i> ($z=14$)	9	-	5	-	-	-
<i>Ti</i> ($z=22$)	-	-	1653	2605	-	-
<i>Mn</i> ($z=25$)	15	44	16		186	266
<i>Fe</i> ($z=26$)	4047	4905	2572	3229	3695	4563

РФА любого типа не способен определять углерод ($z = 6$), азот ($z = 7$) и кислород ($z = 8$) в металлических матрицах. Флуоресцентное излучение этих элементов имеет слишком малую энергию (длинноволновая область), практически полностью поглощается самим образцом и воздухом.

Причины определения алюминия и отсутствия данных о содержании кремния в металле могут быть связаны с условиями эксперимента (прибор оптимизирован для определения алюминия). Дальнейшие исследования могут касаться изменения настроек (например, более высокое напряжения, более длительное время измерения).

Выводы.

1. Чувствительность определения легких элементов достигается за счет вакуумирования рабочей камеры.

2. Использование вторичных мишеней и их правильный выбор позволяет увидеть низкие концентрации легких элементов. Чем ниже атомный номер материала мишени, тем выше интенсивность линий для легких элементов (пример, алюминий).

Список использованных источников

1. Dr. Rousseau R. Detection limit and estimate of uncertainty of analytical XRF results // The Rigaku Journal. 2001. V. 18. № 2. P. 33–47.
2. Jenkins R., Gilfrich J. V. Figures-of-merit, their philosophy, design and use // X-Ray Spectrometry. 1992. V. 21. № 6. P. 263–269.

ЭНЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТ СМЕЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Гаращенко В.Н., Бирюков А.Б.
Донецкий национальный технический университет

Современный уровень развития систем тепло- и энергосбережения позволяет потребителю получать тепловую и другие виды энергии от различных энергосистем, которые своим энергопотреблением он формирует в качестве смежных. Смежные энергетические системы могут рассматриваться как подсистемы в единой энергетической системе на уровне потребителя. Множество таких микро-энергетических систем определяют тепло и энергопотребление, которое изменяется в зависимости от времени суток, времени года и других параметров. В России основы повышения энергоэффективности теплоснабжения определены такими документами, как государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики» [1], ГОСТы [2,3], национальный проект России “Экология” [4].

Для решения сложной задачи определения комплексного критерия экономичности работы теплоэнергетической системы в целом, в которую в качестве подсистем входят смежные энергетические системы необходимо учитывать особенности работы каждой из подсистем [5,6,7].

Предлагается рассматривать схемы теплоснабжения и теплопотребления с использованием единых, в том числе микро-энергетических систем для общей оценки энергоэффективности [8].

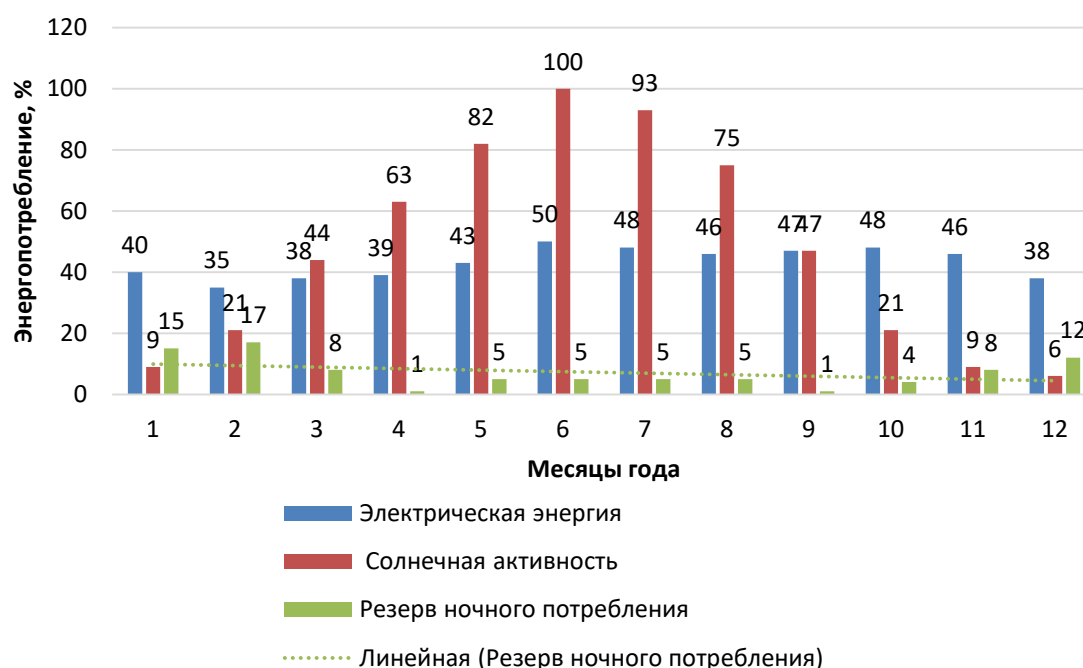


Рисунок 1 – Энергетические потоки в периоде календарного года
Для ряда частных случаев решение задачи избыточной доли генерации (см.

рис.1) может решаться использованием ветровой и солнечной энергии [9].

В случае единой энергетической системы (см. рис.2), в которую входят тепловая электростанция (ТЭС, ТЭЦ, КГЭС) и котельная определение возможного сокращения общего потребления первичных энергоресурсов может быть достигнуто не постоянно, а в определённые часы, в том числе за счёт снижения электропотребления ниже технически возможного минимального уровня генерации электрической энергии с использованием тепловой при «обратной» трансформации электрической энергии в тепловую. Для использования предлагаемых решений в эксплуатации, а также при проектировании реконструкции и нового строительства объектов энергетических систем важно определить величину возможного сокращения (в натуральном и процентном измерении) общих расходов первичных энергоресурсов за всё время использования отопительного оборудования. Необходимость в широком диапазоне регулирования тепло-генерации обусловлено количеством единиц котлов (в случае централизованной отопительной котельной), число которых в большинстве случаев составляет пять единиц, дополнительное и вспомогательное оборудование также может быть диверсифицировано по количеству.

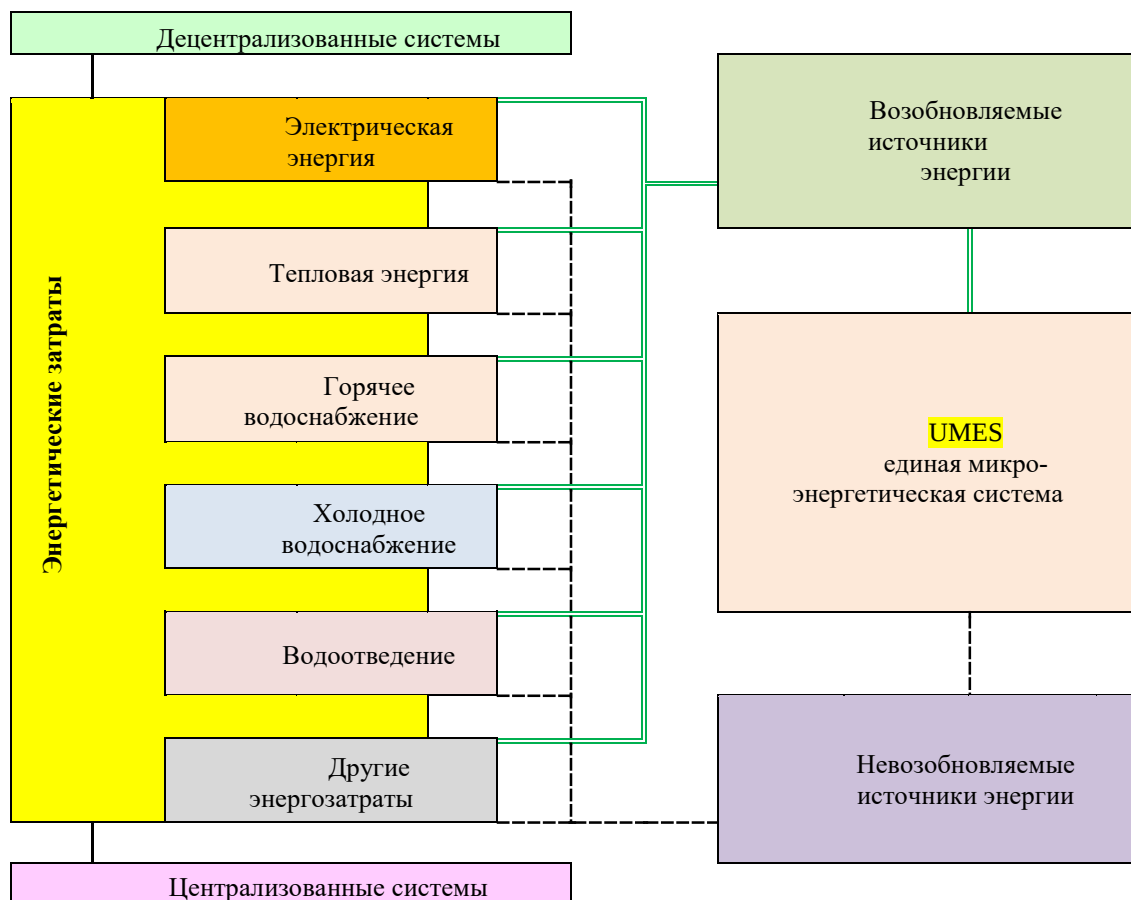


Рисунок 2 – Схема UMES (unified micro-energy system)

Потоки тепловой и электрической энергии изменяются на протяжении года, что связано в первую очередь с сезонностью и солнечной активностью. В месяцы максимальной активности солнца наиболее простым решением развития теплоснабжения в части горячего водоснабжения является использование солнечных коллекторов ГВС, а течение месяцев отопительного периода солнечная активность минимальна и в качестве дополнительного, к имеющимся источникам, для генерации тепловой энергии может использоваться не востребуемая электроэнергия «ночного» тарифа (резерв ночного потребления).

Для частного случая ночных часов самой холодной декады отопительного периода предлагаемое решение заключается в следующем: в ночные часы суток использование тепловой энергии только от водяной системы теплоснабжения с рабочим диапазоном до значения теплопотребления, которое состоит из постоянной $Q_{\text{пост}}$ (для 24-х часов) и переменной $Q_{\text{перем}}$ (для ночных 8-ми часов) составляющих, замещается комбинированным использованием источников тепла и электроэнергии ($Q_{\text{пост}} + W_{\text{перем}}$), при котором тепловая энергия $W_{\text{перем}}$ получена от теплогенерирующего электрооборудования и замещает $Q_{\text{перем}}$.

$W_{\text{перем}}$ производится из электроэнергии, которая в ночные часы не востребована и дополнительные расходы первичных энергоносителей не требуются, в тоже время расход топлива на котельных снижается исходя из значения $Q_{\text{перем}}$ (см. рис.3).

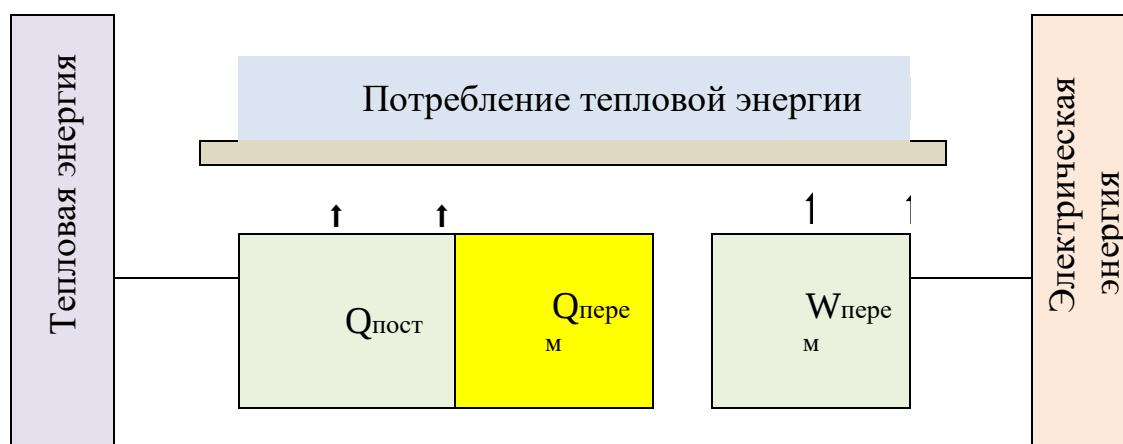


Рисунок 3 –Теплопотребление от источника тепла и от теплогенерирующего электрооборудования при комбинированном теплоснабжении

Таким образом использование отношения использования $W_{\text{перем}}$ к сумме $Q_{\text{пост}}$ и $Q_{\text{перем}}$ может определять численное значение энерго-экономических критериев комбинированного теплоснабжения от смежных энергетических систем часовых, суточных, за отопительный период, сезонных и других.

Для определения эффекта применения предлагаемых решений необходимо, в первую очередь, рассчитывать снижение эксплуатационной

максимальной нагрузки на существующее котельное оборудование котельной для использования только тех котлов и КГУ, работа которых обеспечивает показатели, наиболее соответствующие удельным нормам расхода первичного энергоносителя и минимума потерь, а также сетей теплоснабжения, с одной стороны, и с использованием части не востребовавшей электроэнергии, которая произведена в режиме необходимого минимума генерации на тепловых электрических станциях и ТЭЦ, что обеспечивает снижение роста абсолютных потерь в электрических сетях РФ, с другой стороны. Общий гипотетический эффект в измеримых величинах для энергосистемы, в которых тепловая энергия гипотетически производится котельными с мощностью (Гкал/час) до 3, от 3 до 20 и от 20 до 100 можно определить следующим образом (см. табл. 1):

- энергетический эффект (ТДж), как количество тепловой энергии, на производство которой не были бы затрачены первичные энергоресурсы, используемые котельными (без учета снижения нагрузочных (переменных) потерь в ЛЭП и без учета количества тепловой энергии, необходимой на покрытие тепловых потерь в тепловых сетях);

- экономический эффект (млрд.руб.), как сумма снижения затрат на оплату первичных энергоресурсов (расчетное значение стоимости природного газа принято 5000 руб./1000 куб.м);

- экологический эффект (тыс.т), как снижение выбросов в атмосферу углекислого газа CO₂ (при 0,36 т/МВтч), другие выбросы в данной модели не рассчитываются.

Таблица 1. Энерго-экономический эффект предлагаемых решений

№	Эффект для котельных	Ед.изм.	Часов		
			1	8	80
1	Энергетический всего, в т.ч.:	ТДж	54,840	438,722	4387,217
1.1	- до 3 Гкал/ч	ТДж	8,807	70,457	704,567
1.2	- от 3 до 20 Гкал/ч	ТДж	21,436	171,486	1714,864
1.3	- от 20 до 100 Гкал/ч	ТДж	24,597	196,779	1967,786
2	Экономический всего, в т.ч.:	млрд.руб	8,515	68,119	681,188
2.1	- до 3 Гкал/ч	млрд.руб	1,367	10,940	109,395
2.2	- от 3 до 20 Гкал/ч	млрд.руб	3,328	26,626	266,260
2.3	- от 20 до 100 Гкал/ч	млрд.руб	3,819	30,553	305,532
3	Снижение выбросов CO ₂ всего, в т.ч.:	тыс.т	5,485	43,883	438,827
3.1	- до 3 Гкал/ч	тыс.т	0,881	7,047	70,474
3.2	- от 3 до 20 Гкал/ч	тыс.т	2,144	17,153	171,528
3.3	- от 20 до 100 Гкал/ч	тыс.т	2,460	19,683	196,825

Таким образом расчетное значение основного показателя синергетического эффекта за 80 ночных часов самой холодной декады отопительного периода для рассматриваемой макро модели 2, а именно энергетический эффект составляет

4387,217 ТДж [10].

Решение задачи определения комплексных критериев экономичности работы теплоэнергетической системы, в которую в качестве подсистем входят смежные энергетические системы определяется следующим логическим образом:

- приведение к сопоставимому виду в физических единицах измерения энергии в подсистемах используемых значений, таких как, например, МДж;
- определение общего часового соответствия между общим потреблением и общей генерацией тепловой и других видов энергии;
- определение «часового» соответствия между потреблением тепловой энергии и её генерацией, тоже - для других видов энергии;
- определение имеющихся неиспользуемых резервов, как приоритетных «часовых» периодов в подсистемах, когда при выработке энергии менее определенного количества фактический расход первичных энергоресурсов не уменьшается;
- снижение общего расхода за счёт сокращения потребления первичных энергоресурсов в смежной теплоэнергетической подсистеме за счёт повышения доли энергопотребления от использования резервов, с трансформацией, если это необходимо, в тепловую энергию.

Для частного случая единой энергетической системы, в которую входят тепловая электростанция (ТЭС, ТЭЦ, КГЭС) и котельная сокращение потребления первичных энергоресурсов – это сокращение потребления топлива на котельной с соответствующим повышением потребления электроэнергии от тепловой электростанции в часы снижения электропотребления ниже технически возможного минимального уровня генерации, для «обратной» трансформации электрической энергии в тепловую. Использование предлагаемых решений в эксплуатации, а также при проектировании реконструкции и нового строительства объектов энергетических систем позволяет сократить до 20 % общие расходы первичных энергоресурсов в физическом и денежном выражении в течении отопительного периода.

Литература:

1. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПРОГРАММА РФ "ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ" <https://minenergo.gov.ru/activity/government-program>
2. ГОСТ Р ИСО 50001-2023 "Система энергетического менеджмента" <https://docs.cntd.ru/document/1200195836>
3. ГОСТ Р 55913-2020 Национальный стандарт Российской Федерации. Здания и сооружения. Номенклатура климатических параметров для расчета тепловой мощности системы отопления. Длительность ОП <https://docs.cntd.ru/document/1200177400>
4. Национальный проект России "Экология" https://mnr.gov.ru/activity/np_ecology
5. Бирюков А.Б., Гаращенко В.Н. Направления повышения

энергоэффективности систем генерации тепловой энергии в рамках теплоэнергетики России // Энергетические системы. 2023. № 2. С 17-27.

6. Отчет о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2022 году Минэнерго России // РЭА Минэнерго России [Офиц. сайт] <https://minenergo.gov.ru>

7. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году (на основе оперативных данных) [Офиц. сайт] АО «СО ЕЭС» <https://so-ups.ru>

8. Бирюков А.Б., Гаращенко В.Н. Анализ различных схем использования тепловой энергии: микроуровень теплопотребления // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. 2024. № 4. С. 218-227.

9. Qingsong Zhao, Beijia Yang, Hui Ma, Gang Liu, Jianyuan Xu. Optimal scheduling of the CSP–PV–wind hybrid power generation system considering demand response // Frontiers Energy Research. 2023. DOI: [10.3389/fenrg.2023.1252311](https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1252311)

10. Бирюков А.Б., Гаращенко В.Н. Определение рациональных режимов согласованной работы смежных тепло- и электроэнергетических систем для частного случая самых холодных часов года: микро- и макро- уровни энергопотребления // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2025. № 1. С. 188-197.

СОДЕРЖАНИЕ

1. МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

Лазаренко Н.К., Корзун Е.Л. ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КОВАНЫХ ПРУТКОВ ИЗ СПЛАВА ВЖ718 МЕТОДОМ ТРИПЛЕКС-ПРОЦЕССА....	6
Парталюк С.В., Шевцова Л.А., Тимофеева А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАГРЕВА ШИХТЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	9
Шмаков С.С., Кузин А.В. ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАТА ПРИ ВВЕДЕНИИ В АГЛОШИХТУ РАЗЛИЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ.....	14
Мельниченко М.В., Гнитиёв П.А. ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛОМА ПЕРЕД ЗАГРУЗКОЙ В ДУГОВУЮ СТАЛЕПЛАВИЛЬНУЮ ПЕЧЬ НА ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ	18
Купцова Д.А., Складар В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ ОКАТЫШЕЙ В ОБЖИГОВОЙ МАШИНЕ	20
Беляев В.В., Корзун Е.Л., Цымбаленко А.В. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ СТАЛИ	25
Крестин Р.В., Должиков В.В. РЕГРЕССИОННАЯ ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ	29
Лихтина Е.Ю., Шевцова Л.А., Ермоленко К.А. Тимофеева А.С. ЕДКИЙ НАТР И АДсорбция ВЛАГИ БЕНТОНИТОМ	32
Шевцова Л.А., Тимофеева А.С., Гладкая Е.А. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАЧАЛА САМОРАЗОГРЕВА МЕТАЛЛИЗОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ	35
Гладкая Е.А., Шевцова Л.А., Тимофеева А.С. ДИНАМИКА ОКИСЛЕНИЯ ГОРЯЧЕБРИКЕТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА И ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ	40
Ермоленко К.А., Шевцова Л.А., Лихтина Е.Ю., Тимофеева А.С. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕФОРМЕРА MIDREX ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА РЕАКЦИОННЫХ ТРУБ	45
Назарюк В.Ю., Симоненко В.И. СОЗДАНИЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛИТЫХ ЧУГУНОВ	50
Падалка А.В., Падалка В.П., Кочура В.В. Расчет технологических режимов доменной плавки с применением ПУТ	54

2. ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И СВАРКА

Беруля Е. А., Свинороев Ю.А. ПРАКТИКА РАБОТЫ СКУЛЬПТОРА-ЛИТЕЙЩИКА	59
Болдырева А.А., Свинороев Ю.А. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЛИТЕЙНЫХ СВЯЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ	63
Хворостов Д.В., Пасечник А.Ю. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ИЗ ФАЯЛИТА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПРОЦЕССЕ	67
Коверга А.П., Свинороев Ю.А. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК МЕТОДАМИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ	69
Медведев И.И., Пасечник А.Ю. ВОЗМОЖНОСТИ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ	73
Серга П.В., Свинороев Ю.А. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ИЗ ЛАТУНИ	77
Шинкарева А.А. Свинороев Ю.А., Шинкарева Т.А. ЖИДКОСТЕКОВЫЕ СМЕСИ С ОБЛЕГЧЕННОЙ ВЫБИВАЕМОСТЬЮ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК	82
Черепихина Н.П., Шинкарева Т.А. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «КОРПУС БУКСЫ»	86
Медведев И.И., Хворостов Д.В., Пасечник С.Ю., Симоненко В.И. ПОЛУЧЕНИЕ ЧУГУНА ИЗ ГЕМАТИТОВОЙ РУДЫ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ В ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ	90
Симонов А.Ю., Пасечник С.Ю. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПО ВЫЖИГАЕМЫМ ПОЛИМЕРНЫМ МОДЕЛЯМ	96

3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Глазунов А.В., Закарлюка С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СЛЯБОВ ПРИ ПОЭТАПНОЙ РАЗДАЧЕ ШИРИНЫ	101
Гордиенко В.М., Закарлюка С.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКИХ ПОЛОС К ПОТЕРЕ ПЛОСКОСТНОСТИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ	105
Пашков А.А., Закарлюка С.В. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НАТЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ДЛЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НЕПЛОСКОСТНОСТИ	111
Кукушкина Ю.Ю., Яковченко А.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ	

КАЛИБРОВКИ ПРЕДЧИСТОВОГО ОВАЛЬНОГО КАЛИБРА ДЛЯ ПРОКАТКИ КРУГЛОГО ПРОФИЛЯ ДИАМЕТРОМ 50 ММ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ 390	116
Тимоха А.С., Яковченко А.В. РАЗРАБОТКА ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРХНЕМ РОЛИКЕ ТРЕХВАЛКОВОЙ ЛИСТОГИБОЧНОЙ МАШИНЫ НА БАЗЕ МЕТОДА ПЛАНИРУЕМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	119
Чернышёва О.В., Яковченко А.В. УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ФОРМОВКИ ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК СВАРНЫХ ТРУБ ДИАМЕТРОМ 1220 ММ НА СЕМИКЛЕТЬЕВОМ СТАНЕ	122
Чумак Н.Ю., Яковченко А.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ СЖАТИИ	125
Гангало А.Н., Мирошниченко С.В. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЗОНЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИИ	128
Чабан М.Р., Скляр В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ РОМБИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ В КВАДРАТНОМ КАЛИБРЕ	133
Ширкина. Е.С., Болобанова Н.Л. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ ПРИ РОЛИКОВОЙ ПРАВКЕ	138

4. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ

Бакиров Д.Д., Рябов А.Д., Хлыбов А.А. ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАГОТОВКИ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ	144
Бессонова О.В., Осколкова Т.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ЗАЭВТЕКТОИДНОГО СОСТАВА НА КИНЕТИКУ РАСПАДА АУСТЕНИТА	147
Иксанов Р.Р., Рябов А.Д., Хлыбов А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ	151
Кириллова А.Н., Рябов Д.А., Хлыбов А.А. ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА SUPER DUPLEX 25Cr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО	

ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ	153
Милашин М.М., Мельниченко О.П., Фарафонтова А.А. МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФЕРРИТОВЫХ СВАРОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ	157
Миронова А.В., Мельниченко О.П., Мясников А.С. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	160
Олифиренко И.А., Осколкова Т.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ МАРКИ 76ХФ С НОВЫМ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ	165
Розуменко Д.А., Егоров Н.Т. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО — ДЕФОРМАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ПРАВКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ	168
Сахаров А.С., Горбатенко В.П. ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ С УСКОРЕННЫМ ПОСЛЕДЕФОРМАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ 10Г2ФБ	170
Сахаров А. С., Крымов В. Н. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ	176
Савула Е.А., Крымов В.Н., Горбатенко В.П. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЦИНКОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ БОРИРОВАННОЙ СТАЛИ	180
Турусов Е.М., Рябикина М.А. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛИТ В СРАВНЕНИИ СО СТАЛЬЮ 75ХФТЛ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ УЗЛОВ АГЛОФАБРИК	183
Юнусов А.М., Осколкова Т.Н. ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕЙНИТНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ	187
Яшарова Е.В., Гангало А.Н. ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ ПОСЛЕ РКУП И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ГИДРОПРЕССОВАНИЯ	193

5. ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Хохлова М.Е., Герцык С.И. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ	198
Сиволдаев Н.А., Кашаев В.В. СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ЖЕЛОБОВ И СЛИВНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	203
Мельниченко М.В., Гнитиёв П.А. СИСТЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛОЛОМА В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ	

ОСОБЕННОСТИ	207
Уколов А.В., Кашаев В.В. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ОБРАЗОВАНИЯ NO _x В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ	211

5. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Билиджан М.Г., Безбородов Д.Л. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦВЕТА ПОКРЫТИЯ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА.....	217
Демченко А.Е., Безбородов Д.Л., Зайцева П.А. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.	221
Гомонова К.В., Салмаш И.Н., Зайцева П.А. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ И ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ И ИХ РОЛЬ В МЕРОПРИЯТИЯХ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ.....	224
Петрова С.С., Гридин С.В. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПРИ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ШАХТНЫХ ВОД	227
Смоляков М.В., Гридин С.В., Боровская А.В. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ	230
Калмыков И.Л., Гридин С.В. ТЕХНИКО - ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДА.....	234
Крапивин А.С., Гридин С.В. АНАЛИЗ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ.....	238
Легенькая С.В., Лебедев А.Н. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЛА КВГ-6.5: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ЗАМЕНЫ ГОРЕЛОК И КСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА.....	243
Каминский К.Д., Пацин А.Д., Лебедев А.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ЖКХ ПУТЁМ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ И ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА.....	247

6. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Асламов В.Н., Асламова Я.Ю., Полухина С.В. РОЛЬ ЛОКАЛЬНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ, ПОДВЕРГШИХСЯ ИНТЕНСИВНОМУ ТЕХНОГЕННОМУ И БОЕВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ...	252
Бузановский И.С., Ошовский В.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЭТАНИЗАЦИИ ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА С ПОМОЩЬЮ	

СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ	257
Даниленко А.С., Радионенко В.Н. ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАВОЗОХРАНИЛИЩ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ	261
Голубев Д.И., Крымов В.Н. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ	264
Колотушкин Р.Р., Ошовский В.В. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КОЛОННЫХ АППАРАТОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ	269
Паневина М.А., Федотов О.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕЦИКЛИНГА ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ КОКСОВОГО ПРОИЗВОДСТВА	272
Пастухов И.Б., Асламова Я.Ю., Полухина С.В. ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИИ КАК СЫРЬЕВОЙ РЕСУРС ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВКИ	276
Попова А.Э., Куберский С.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА КОКСОВОГО ГАЗА	280
Рябков В.А., Башева Т.С. КОМПОСТИРОВАНИЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД УТИЛИЗАЦИИ ДРЕВЕСНО-ЛИСТВЕННЫХ ОТХОДОВ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ...	284
Селюч Ю.В., Радионенко В.Н. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	289
Сырых А.А., Трошина Е.А., Горбатко С.В. ВОЗМОЖНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ПЫЛИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА	292
Падалка А.В., Падалка В.П., Кочура В.В. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ВДУВАНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	295
Помазан Н.С., Пильгук С.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ	299
Гарашенко В.Н., Бирюков А.Б. ЭНЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТ СМЕЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	303

Научное издание

**ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
XXI СТОЛЕТИЯ
ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ**

Сборник материалов
Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых и обучающихся
26-27 мая 2026 г.

Ответственный редактор – Кочура Владимир Васильевич