

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова

«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»

Електронне видання збірки наукових праць

Випуск 1

м. Дніпро
2017

Наука і металургія. Електронне видання збірки наукових праць. – Випуск 1. – Дніпро. 2017.

Редакційна колегія випуску:

- Бабаченко О. І.** д.т.н., директор ІЧМ НАНУ;
Вергун О.С. д.т.н., заступник директора ІЧМ НАНУ;
Меркулов О.Є. к.т.н., с.н.с., вчений секретар ІЧМ НАНУ;
Тогобицька Д. М. д.т.н., проф., зав. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАНУ;
Чернятевич А. Г. д.т.н., проф., зав. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАНУ;
Шевченко А. П. д.т.н., с.н.с., зав. відділу позапічної обробки чавуну ІЧМ НАНУ;
Муравйова І. Г. д.т.н., с.н.с., зав. відділу технологічного обладнання та систем управління ІЧМ НАНУ;
Приходько І. Ю. д.т.н., с.н.с., зав. відділу обробки металів тиском ІЧМ НАНУ;
Луценко В. А. д.т.н., с.н.с, пров. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАНУ;
Нестеров О. С. к.т.н., с.н.с. зав. відділу металургії чавуну ІЧМ НАНУ;
Тубольцев Л. Г. к.т.н., с.н.с. зав. відділу прогнозу та інформаційно-технічних досліджень в металургії

Електронне видання збірки наукових праць «Наука і металургія» затверджене рішенням Вченої ради Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України від 15.06.2017р. протокол №4.

Адреса редакції: 49107, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1,
Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,
Тел.: +38 (056)776-53-15,
Тел/факс: +38 (056) 790-05-12,
E-mail: office.isi@nas.gov.ua,
www.isi.gov.ua

УДК 669.162.252

В.В. Алхасова

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 6 НА ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГУБТ

*Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр
металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков*

Приведены результаты испытаний газоочистки доменной печи. Определен рациональный режим эксплуатации газоочистного оборудования.

Ключевые слова: газоочистка, доменная печь, газовая утилизационная турбина, запыленность, гидравлическое сопротивление

Постановка проблемы. Использование потенциальной энергии сжатого доменного газа для производства электрической энергии в газовой утилизационной бескомпрессорной турбине (ГУБТ) перспективное, но мало востребованное в странах СНГ направление по энергосбережению в черной металлургии. В настоящее время в эксплуатации на территории СНГ находятся всего три ГУБТ, одна из которых установлена за доменной печью № 6 (ДП-6) ОАО «ЕВРАЗ НТМК». В то же время в Японии и странах Европы ГУБТ установлены практически за всеми доменными печами.

Изложение основных материалов исследования. ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» совместно с газовым цехом ОАО «ЕВРАЗ НТМК» проведены испытания газоочистки ДП-6 для определения оптимального температурного и гидравлического режимов, а также повышения давления перед турбиной с целью увеличения выработки электроэнергии в ГУБТ. Для этого определялась эффективность работы газоочистки ДП-6 и величина минимального перепада давления на трубах Вентури с достижением конечной запыленности доменного газа 4 мг/м^3 . Очистка доменного газа до конечного пылесодержания 4 мг/м^3 необходима для обеспечения надежной работы турбин и других потребителей доменного газа (доменные воздухонагреватели, ТЭЦ и др.).

Доменная печь № 6 объемом 2200 м^3 работает с автоматическим поддержанием давления газа на колошнике системой очистки газов. Особенностью технологии является выплавка ванадиевого чугуна. Загрузка шихтовой смеси производится через бесконусное загрузочное устройство фирмы «Paul Wurth».

Газоочистка ДП-6 предназначена для очистки и охлаждения отходящего от доменной печи доменного газа. Очистка доменного газа от пыли производится последовательно в 2-х ступенях:

- грубая очистка в сухом пылеуловителе радиального типа;
- тонкая очистка в «мокрой» газоочистке системы «Paul Wurth».

После газоочистки установлен турбогенератор ГУБТ-12 для выработки электроэнергии за счет избыточного давления доменного газа.

Газоочистка производства «Paul Wurth» [1] состоит из скруббера с трубами Вентури с кольцевым регулируемым зазором (так называемых элементов с кольцевым зазором - ЭКЗ) и каплеотделителя для улавливания капельной влаги. Принципиальная схема газоочистки представлена на рис. 1.

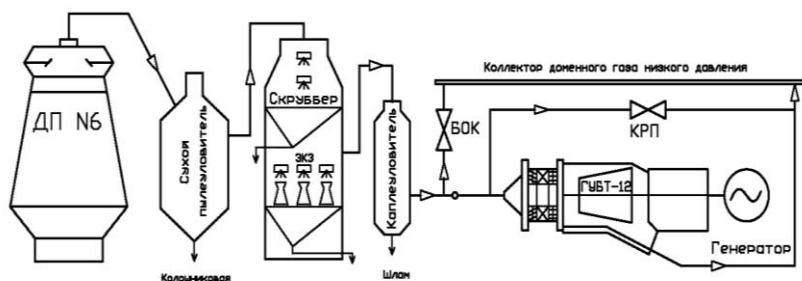


Рисунок 1 – Принципиальная схема газоочистки

Для определения оптимального режима работы системы «газоочистка – ГУБТ» проведен ряд испытаний при различных положениях регулирующего конуса труб Вентури (ЭКЗ) с гидравлическим сопротивлением в пределах 20–45 кПа. Оптимальный режим – это режим, при котором обеспечивается очистка доменного газа до нормативных показателей с минимальным гидравлическим сопротивлением на газоочистке. Увеличение гидравлического сопротивления ЭКЗ, приводит к уменьшению давления перед ГУБТ и снижению выработки электроэнергии. В табл. 1 приведены данные инструментальных измерений конечной запыленности доменного газа по трем основным режимам.

По результатам проведенных испытаний газоочистки сделан вывод, что при гидравлическом сопротивлении ЭКЗ 40–43 кПа и скорости газа в кольцевом зазоре ЭКЗ 210 м/с конечная запыленность доменного газа составляет 3 мг/нм³. При снижении гидравлического сопротивления ЭКЗ до 32–34 кПа скорость в кольцевом зазоре ЭКЗ снижается до 190 м/с, а конечная запыленность доменного газа находится в пределах 4–4,5 мг/нм³. При дальнейшем понижении гидравлического сопротивления ЭКЗ до 25 кПа скорость в кольцевом зазоре ЭКЗ снижается до 160 м/с, конечная запыленность доменного возрастает до 6 мг/нм³.

После газоочистки ДП-6 установлен турбогенератор ГУБТ-12, предназначенный для производства электрической энергии за счет

избыточного давления доменного газа. Турбина осевая, двухступенчатая, прямоточная, оснащена автоматизированной системой контроля и защиты. Фактически развиваемая турбиной мощность зависит от режима работы доменной печи и определяется расходом и давлением проходящего через турбину газа.

Таблица 1. Результаты испытаний газоочистки ДП-6

№ п/п	Наименование параметров	Режимы		
		1	2	3
1	Давление газа на колошнике, кПа	218–220	220	219,5–220
2	Общий расход газа, тыс. м ³ /ч (н.у.) *	420–430	400–410	410–420
3	Перепад давления на ЭКЗ, кПа *	40–43	32–34	24–25
4	Расходы воды, общий, м ³ /ч: – на скруббер (ф. 4-11) – на ЭКЗ – рециркулируемой (ф. 1-3)	1410 980 415 480	1395 980 415 480	1440 1010 430 500
5	Конечная запыленность, средние значения, мг/нм ³	3	4	6
6	Давление газа перед ГУБТ, кПа	165	178	185
7	Температура газа перед ГУБТ, °С	57–58	55–56	56–58
8	Выработка электроэнергии, МВт·ч	6,4	7–7,2	7,6

* усредненные значения расходов газа и перепадов давления

Через турбину проходит максимально возможный объем газа, составляющий 380 тыс. м³/ч, остальной газ проходит через клапан КРП и сбрасывается в сеть доменного газа в обход турбины, через байпас.

Увеличение давления перед турбогенератором с 170 кПа до 182 кПа при прочих равных условиях увеличивает выработку электроэнергии с 6,8 МВт·ч до 8,2 МВт·ч. Однако, при этом содержание пыли в доменном газе превышает нормативные значения. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Содержание пыли в доменном газе в количестве более 4 мг/нм³ приводит к интенсивному образованию отложений на направляющем аппарате и лопатках ротора ГУБТ-12, что является причиной увеличения местных потерь, увеличения концевых и профильных потерь, уменьшения выработки электроэнергии и снижения эксплуатационных показателей турбины.

Сравнительный анализ результатов данной работы и проведенных в 2008 г. исследований [2] показывает, что увеличение расхода, температуры и давления газа перед ГУБТ увеличивает выработку электроэнергии на 30 %. Также увеличению выработки электроэнергии

способствует повышению температуры доменного газа перед турбиной и увеличение угла установки поворотных лопаток до 52°.

Таблица 2. Результаты испытаний

№ п/п	Наименование параметров	Режимы				
		1 ($\Delta p_{\text{ЭКЗ}} =$ 43 кПа)	2 ($\Delta p_{\text{ЭКЗ}} =$ 35 кПа)	3 ($\Delta p_{\text{ЭКЗ}} =$ 30 кПа)	4 ($\Delta p_{\text{ЭКЗ}} =$ 25 кПа)	5 ($\Delta p_{\text{ЭКЗ}} =$ 20 кПа)
1	Давление газа на колошнике, кПа	220	220	220	220	220
2	Расход газа, тыс. м ³ /ч (н.у.)	460–480	450–480	440–460	430–460	430–460
3	Расход газа через КРП, тыс. м ³ /ч (н.у.)	90	82	64	79	75
4	Расход газа перед ГУБТ, тыс. м ³ /ч (н.у.)	380	380	380	380	380
5	Давление доменного газа, кПа: перед ГУБТ / после ГУБТ	170/12,5	172/12,5	174/12,5	178/12,5	182/12,5
6	Выработка электроэнергии, МВт·ч	6,8–7	7,4	7,6	8	8,2

Таблица 3. Результаты испытаний, проведенных в 2008 г. и 2015 г.

№ п/п	Наименование параметров	Режимы			
		1	2	3	4
		2015 г.	2008 г.		2015 г.
1	Перепад давления на ЭКЗ, кПа	25–27	25–27	20–21	20–21
2	Давление газа на колошнике, кПа	220	184–186	184–186	220
3	Расход газа, тыс. м ³ /ч (н.у.)*	430–460	280–300	255–270	410–430
4	Расход газа через КРП, тыс. м ³ /ч (н.у.)*	80	–	–	60–70
5	Расход газа перед ГУБТ, тыс. м ³ /ч (н.у.)*	380	250	250	380
6	Температура газа перед ГУБТ, °С	58–60	45	45	58–60
7	Давление доменного газа, кПа: перед ГУБТ / после ГУБТ	178/12,5	150/13,5	150/13,5	182/12,5
8	Выработка электроэнергии, МВт·ч	8	4,45	5,5	8,2

* усредненный расход газа

При снижении расхода газа, проходящего через турбогенератор, на 30 тыс. м³/ч, а температуры газа на 2 °С, выработка электроэнергии снижается на 0,4 МВт•ч.

При максимальном расходе газа на турбине с одновременным снижением перепада давления на трубах Вентури (ЭКЗ) и, соответственно, увеличением давления перед ГУБТ с 166 кПа до 179 кПа, выработка электроэнергии увеличивается на 0,6 МВт•ч.

В рекомендованном режиме работы газоочистки с перепадом давления на ЭКЗ 35 кПа и расходом воды на газоочистку 1410 м³/ч обеспечивается конечная запыленность доменного газа перед ГУБТ до 4 мг/нм³ и увеличивается выработка электроэнергии.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований рекомендуется режим работы системы «газоочистка – ГУБТ» с перепадом давления на ЭКЗ 35 кПа и температурой газа перед турбиной 58–60 °С, обеспечивающий конечную запыленность доменного газа перед ГУБТ 4 мг/нм³. Данный режим подтверждает возможность эффективной работы оборудования с минимальными потерями и с увеличением выработки электроэнергии.

1. *Кремер А., Вайсерт Х., Давиди К.* Современные технические решения по комплексу газоочистки доменной печи завода «Штальверке Бремен» // *Сталь*. – 2001. – № 10. – С. 87–89.
2. *Сталинский Д. В.* Решение проблем очистки доменного газа и энергосбережения / Д. В. Сталинский, Г. М. Каненко, В. В. Алхасова // *Сталь*. – 2008. – № 6. – С. 85–90.

В. В. Алхасова

Вплив параметрів роботи газоочистки доменної печі № 6 на отримання електроенергії в ГУБТ

Наведено результати випробувань газоочистки доменної печі. Визначено раціональний режим експлуатації газоочисного устаткування.

Ключові слова: газоочистка, доменна піч, газова утилізаційна турбіна, запиленість, гідравлічний опір

V. V. Alkhasova

Influence of the parameters of the gas cleaning of blast furnace number 6 on the receipt of electricity in the GRFT.

The test results of gas cleaning of blast furnace were provided. The efficient operation mode for gas cleaning.

Keywords: gas cleaning, blast furnace, gas utilization turbine, dust, hydraulic resistance

УДК 669.184.244.66

**С. И. Семейкин, А. Г. Чернятевич, Т. С. Голуб, С. А. Дудченко,
В. В. Вакульчук**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ
ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОВОЛЬТНОГО ПОТЕНЦИАЛА
НА ШЛАКО-МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ВАННУ**

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

В работе выполнено высокотемпературное моделирование поведения шлако-металлической ванны в условиях наложения низковольтного потенциала. Установлены принципиальные отличия в характере отклика ванны на включение/отключение потенциала в зависимости от периода продувки плавки, а также отмечено меньшая интенсивность запыленности подфурменной области и выносов шлако-металлической эмульсии в случае применения низковольтного потенциала, особенно отрицательной полярности.

Ключевые слова: горячее моделирование, индукционная печь, кислородная продувка сверху, низковольтный электрический потенциал

Постановка задачи. Не смотря на достаточно длительный период существования и всестороннего изучения кислородно-конвертерного процесса он обладает все еще достаточно большими резервами повышения технико-экономических показателей. Таким образом научно-практические исследования, в частности методом проведения высокотемпературного моделирования, направленные на использование этих резервов и решение главных задач – повышения эффективности производства и улучшения качества стали являются сегодня актуальными и востребованными.

В ИЧМ НАНУ проводится отработка метода воздействия низковольтного потенциала на кислородно-конвертерную ванну, способствующего, как показали многочисленные промышленные опыты, улучшению целого ряда сопровождающих конвертирование процессов [1]. В связи с этим представляет интерес проведение исследований с целью выявления особенностей и характера отклика конвертерной ванны на наложение низковольтного потенциала по ходу продувки плавки для дальнейшей оптимизации дутьевого и шлакового режимов, что обеспечит снижение потерь металла при его продувке.

Для проведения опытов создана в условиях лабораторного участка ДГТУ на базе 160-кг индукционной печи, дооборудованной фурменным четырех сопловым модулем (диаметр сопла 1,7 мм, угол наклона 14°), системой отвода дымовых газов и системой подвода низковольтного потенциала, экспериментальная установка (рис. 1) [2].

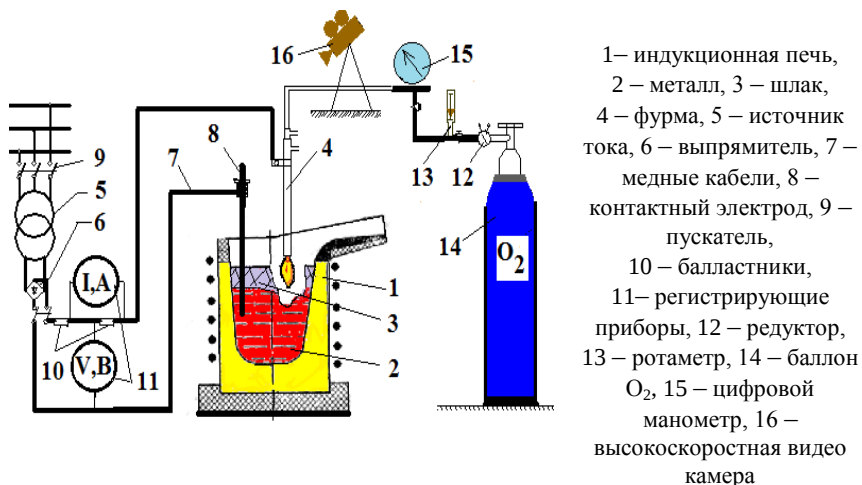
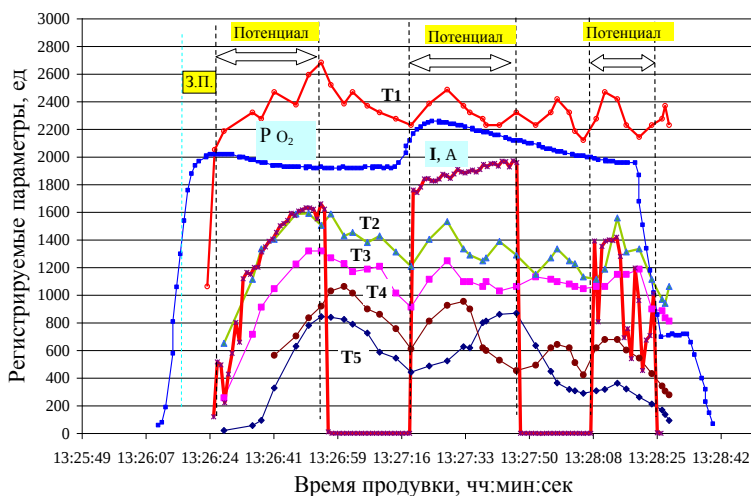


Рисунок 1 – Принципиальная схема проведения опытов

Методика экспериментов. В индукционной печи расплавляли 100-120кг чугуна с содержанием углерода 4,2-3,2 и нагревали до температуры порядка 1450- 1550 С°. После печь выключали и производили продувку расплава кислородом. С началом подачи кислорода включали подачу от источника тока напряжения на фурму и контактный электрод. Было проведено 6 опытных продувок, по две без воздействий и с наложением потенциала отрицательной и положительной полярностей соответственно, во время которых потенциал включали и выключали с интервалом 40 сек с целью определения реакции шлако-металлической эмульсии на внешнее воздействие. Оценка реакции ванны производилась как по визуальным данным, так и по разработанной методике посекундного сканирования видеоматериала с использованием чувствительного фотоэлемента ФС-3, реагирующего на яркостные изменения видеокadra (базой являлась фактически замеренная пирометром температура высокотемпературной области и факела по ходу продувки). Оценивались следующие участки ванны: подфурменная высокотемпературная область (T_1); зона, окружающая высокотемпературную область (T_2); шлаковая фаза (T_3); футеровка, контактирующая со шлаковым расплавом (T_4); шлак на корпусе фурмы (T_5). Также непрерывно регистрировали давление кислорода перед фурмой, температуру воды после охлаждения фурмы, напряжение и силу тока на участке фурма - расплав.

Обсуждение результатов. Анализ полученных параметров позволил установить следующее (на рис. 2 для примера показаны диаграммы

изменения зарегистрированных характеристик при проведении продувки с потенциалом отрицательной полярности на фурме).



3.П. – период зажигания, «Потенциал» – период действия потенциала; PO_2 – давление кислорода перед соплами, атм $\times 0,001$; I, A – сила тока в цепи фурма ванна, $A \times 0,05$; температурно-фотометрические показатели, $^{\circ}C$: T_1 – в высоко-температурной области, T_2 – в зоне, окружающей высокотемпературную, T_3 – на шлаке T_4 – на футеровке при контакте со шлаком, T_5 – шлак на корпусе фурмы.

Рисунок 2 – Диаграмма изменения показателей продувки и фотометрических данных различных участков сталеплавильной ванны при продувке с периодическим подводом отрицательной полярности потенциала

Регистрация изменения давления кислорода перед соплами при неизменной его подаче позволила установить момент подъема шлака до наконечника фурмы: начало подъема давления на графике соответствует моменту касания шлака наконечника фурмы, а величина дополнительного приращения давления соответствует глубине погружения фурмы в шлак, что обусловлено необходимостью преодоления кислородной струей гидростатического давления, создаваемого поднятым выше среза наконечника слоем шлака. Наиболее четко данный эффект проявился при отрицательной полярности на фурме, которая, как известно из предыдущих исследований, способствует наведению и подъему шлака [3]. Данный эффект подтверждается видео кадрами, причем пик подъема давления соответствует максимальному заглублению наконечника в шлак.

При положительной полярности потенциала противодействие от шлакового расплава было менее выражено на диаграмме. Это связано с визуально зарегистрированным отталкиванием шлако-металлической эмульсии от концевика фурмы при применении данного варианта, что способствует созданию свободного пространства для выхода газа.

Фотометрический анализ видеоматериала показал на всех проанализированных участках волнообразное изменение температур по ходу продувки. Выявлен значительный перепад температур по ходу продувки между высокотемпературной и окружающей ее зоной (T_1 и T_2), что в начале продувки соответствует температуре первичной реакционной зоны, а в основной период отражает процесс дожигания CO до CO₂.

Периодическое отключение низковольтного потенциала выявило, что реакция шлако-металлической ванны на включение/отключение зависит от периода продувки плавки. Так включение потенциала в начальный период продувки – период окисления кремния, характеризовалось заметным подъемом температуры во всех исследуемых областях: наибольшие изменения отмечены в зоне, окружающей высокотемпературную, и на шлаке (перепад составляет примерно 1000 °C), а наименьший на футеровке (перепад до 300 °C). В моменты выключения потенциала, не смотря на постоянную подачу кислорода, отмечен спад температуры: в большей мере в высокотемпературной области (при первом отключении до 500 °C), а в меньшей степени на футерке (до 300 °C).

Повторное включение низковольтного потенциала уже в период начала окисления углерода, как показал график изменения давления кислорода перед соплами, привело к энергичному подъему шлаковой фазы, что характерно для данной полярности потенциала, и подтверждением чему также является наиболее высокие значения силы тока в этот период за счет увеличения поверхности соприкосновения шлако-металлической фазы с корпусом фурмы. В этот период отмечено восстановление температурных условий. Второе отключение потенциала отразилось в большей степени на температурных показателях фурмы и футеровки, и практически не отразилось на температурах высокотемпературной и окружающей ее областей.

Третье включение было отмечено некоторым приростом всех температурных показателей по зонам ванны, однако его уровень был значительно меньше по сравнению с предыдущими периодами, что связано с вероятным ухудшением контакта в цепи фурма-ванна, о чем свидетельствует наиболее низкий и нестабильный уровень силы тока.

Подробный покадровый анализ полученного видео материала позволил установить принципиальное визуальное различие в характере взаимодействия струй со сталеплавильной ванной при подведении к фурме той или иной полярности потенциала. Прежде всего, отмечено существенное отличие в яркости подфурменной зоны по изученным

вариантам, связанной как с температурой, так и с запыленностью этого участка ванны. Минимальная яркость и наибольшее количество брызг отмечены на продувках без воздействий, что указывает на высокий уровень запыленности. Наиболее высокие показатели яркости на большей протяженности продувки были отмечены при отрицательной полярности с формированием «вязких» с высоким поверхностным натяжением всплесков, практически без дробления на мелкие капли, в связи с чем можно предполагать меньший уровень запыленности отходящих газов в данном варианте. Положительная полярность характеризовалась средним уровнем яркости и запыленности подфурменной зоны. Схожие явления по поведению поверхности шлаковой фазы были установлены в момент повалки конвертера при проведении промышленных экспериментов на конвертерах объемом 60 и 160-т [3].

Выводы. Проведенные путем горячего моделирования исследования отклика и поведения шлако-металлической ванны при наложении низковольтного потенциала позволили получить следующие новые научные данные. Регистрация изменения давления кислорода перед соплами при неизменном его значении позволила установить момент подъема шлака до наконечника фурмы, а величина дополнительного приращения давления - глубину погружения фурмы в шлак, что особенно ярко проявляется в случае подведения отрицательной полярности.

Выявлен значительный перепад зарегистрированных температур по ходу всей продувки между высокотемпературной и окружающей ее зоной, что в начале продувки соответствует температуре первичной реакционной зоны, а в основной период продувки отражает процесс дожигания CO до CO₂ при раскрытии «свищей», наполненных CO.

Периодическое отключение низковольтного потенциала выявило, что реакция шлако-металлической ванны на включение/отключение зависит от периода продувки. Включение и отключение потенциала в период окисления кремния характеризуется значительным подъемом и спадом температуры. В период начала окисления углерода включение вызывает энергичный подъем шлака с восстановлением уровня температуры с более инертной реакцией на отключение потенциала.

Покадровый анализ видео материала позволил установить, что наименьшим уровнем светимости, а значит наибольшей запыленностью, характеризуются плавки без воздействий, а наименьшей запыленностью и меньшим уровнем выноса шлако-металлических капель – плавки с подведением низковольтного потенциала отрицательной полярности.

1. Семькин С. И. Применение электрического воздействия малой удельной мощности при кислородно-конвертерной плавке стали // С.И. Семькин, В.Ф. Поляков// Сталь. – 2014. - №9.-С.12-16

2. *Чернятевич А. Г.* Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса/ А. Г. Чернятевич // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. - № 12. – С. 16-18.
3. *Семыкин С. И* Исследование особенностей влияния низковольтного потенциала на процессы рафинирования металла в кислородном конвертере/ С. И. Семыкин, Т. С. Кияшко, Е.В. Семыкина //Металл и литье Украины. – 2011. - №7. – С.29-33

***С. І. Семикін, А. Г. Чернятевич, Т. С. Голуб, С. А. Дудченко,
В. В. Вакульчук***

Дослідження на високотемпературній моделі особливостей впливу низковольтного потенціалу на шлако-металеву ванну

В роботі виконано високотемпературне моделювання поведінки шлако-металевої ванни в умовах накладення низковольтного потенціалу. Встановлено принципові відмінності в характері відгуку ванни на включення/відключення потенціалу в залежності від періоду продувки плавки, а також відзначено менша інтенсивність запиленості підфурменної області і виносів шлако-металевої емульсії в разі застосування низковольтного потенціалу, особливо негативної

УДК 628.1.034.2:628.179.2:54

А. И. Кондратенко, А. М. Камуз

**ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ SWiP С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТОК**

*Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр
металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков*

Представлены результаты исследований коррозионной устойчивости образцов, изготовленных из стали марки Ст. 3 и из биметаллического материала. Приведено описание лабораторной установки. Проведено сравнение установленных характеристик, подтверждающих целесообразность применения биметалла для изготовления аппаратов газоочисток.

Ключевые слова: коррозия, аппараты газоочистки, биметалл, сталь Ст. 3, скорость коррозии, коррозионное проникновение

Постановка проблемы. На ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (ПАО «АМКР») с 2014 г. наблюдалась интенсивная коррозия аппаратов газоочистки доменной печи № 9 (ДП-9). В частности, коррозии подвержены трубы Вентури, выполненные из стали марки Ст.3, в то время как в скруббере, выполненном из нержавеющей стали, а также на аналогичных газоочистках доменных печей №№ 6, 7, 8 цеха № 1 коррозии

не наблюдается. С целью снижения интенсивности коррозии и продления срока службы газоочистки, фирмой ООО «Стил Ворк» было предложено выполнить элементы газоочистки из биметаллического материала.

Биметаллические листы SWIP (Steel Work Innovation Plate) состоят из двухслойного материала, представляющего собой единое целое и включающего два различных металла (сталь или сплав), прочно соединенные между собой по всей плоскости соприкосновения. Слои обозначаются различными терминами – основной и наплавленный слой – по функциональному принципу. Основной слой – наружный – принимает на себя механические нагрузки. Наплавленный слой – внутренний – имеет высокую износостойкость и выполняет защитную функцию.

Материалы исследования. В экспериментах по сравнению коррозионной стойкости материалов были использованы пластины из Ст.3 размером 50х30х4 мм, 60х30х8мм и биметаллические пластины размером 60х30х8 мм. По результатам химанализа воды оборотного цикла газоочистки № 5 ДП-9 был приготовлен рабочий раствор, соответствующий солевому составу воды (табл. 1). Образцы (пластины) помещались в стаканы, раствор в которых перемешивался во избежание образования застойных зон.

Таблица 1. Химсостав воды, используемой в эксперименте

Наименование показателей	Значение показателей, мг-экв/дм ³
Щелочность	0,9
Ca ²⁺	14
Mg ²⁺	3
Cl ⁻	24,23
SO ₄ ²⁻	7,88

Для моделирования перемешивания воды была собрана установка с электродвигателем. Установка включала девять лопастей-мешалок, каждая из которых опускалась в отдельный стакан (рис. 1). Скорость вращения мешалок составляла 180 об./мин, объем рабочего раствора в каждом стакане – 300 мл. Для обеспечения постоянной температуры рабочего раствора использовалась водяная баня. Температура поддерживалась на уровне 34÷36 °С.



Рисунок 1 – Установка для испытания образцов

Изложение основных материалов исследования. Перед началом эксперимента индикаторные пластины были обработаны по специальной методике [1] (в том числе, подвергнуты обработке концентрированной кислотой, высушены и взвешены с точностью до четвертого знака).

Исследования основывались на изучении динамики снижения массы металлических пластин в водных растворах при различных значениях pH с различными дозами ингибиторов, а также в отсутствие ингибиторов.

Параметры коррозионного процесса определяли следующим образом [2]:

- скорость коррозии K рассчитывали по формуле (1):

$$K = \frac{P_0 - P_1}{F \cdot t}, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (1)$$

где P_0, P_1 – вес пластин до и после эксперимента, г;

F – площадь поверхности пластин, м^2 ;

t – время эксперимента, ч;

- коррозионное проникновение Π рассчитывали по формуле (2):

$$\Pi = 8,76 \cdot \frac{K}{\gamma}, \text{ мм/год}, \quad (2)$$

где K – скорость коррозии, $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$;

γ – удельный вес металла, г/см^3 ;

8,76 – переводной коэффициент.

Первый эксперимент проводился одновременно на девяти пластинах размером 50x30x4 мм при температуре 35÷36 °C и начальном pH = 2,0 без применения ингибиторов коррозии. Целью эксперимента было определение интенсивности коррозии в воде при отсутствии ингибитора с одновременным определением погрешности получаемых результатов.

Общая длительность эксперимента составила 3 часа (цикл из трех шагов по 1 часу). Установка для перемешивания работала непрерывно в

течение 1 часа, затем производились определение pH растворов, обработка пластин кислотой и их взвешивание. Обобщенные результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты экспериментов по износу стали в кислой среде без влияния ингибиторов коррозии

№ стакана	Начальное значение pH	Скорость коррозии, г/м ² ч	Коррозионное проникновение, мм/год
1	2,0	4,2529	4,7763
2	2,0	3,8218	4,2922
3	2,0	4,5211	5,0775
4	2,0	4,1571	4,6687
5	2,0	3,8889	4,3675
6	2,0	4,2337	4,7548
7	2,0	3,4962	3,9265
8	2,0	4,7414	5,3250
9	2,0	4,0038	4,4966
Среднее	2,0	4,1241	4,6317

Погрешность эксперимента определяли по формуле (3):

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{\text{cp}} - K_i)^2}{n - 1}}, \quad (3)$$

где n – количество экспериментов (в нашем случае, стаканов), n = 9;

K_i – скорость коррозии для каждого эксперимента (стакана);

K_{cp.} – средняя скорость коррозии по всем экспериментам (по всем стаканам).

Порядок определения средней квадратической погрешности показан в таблице 3.

Таблица 3. Определение погрешности измерений по первому эксперименту

№ стакана	Скорость коррозии пластин, K _i , г/м ² ч	K _i – K _{cp.}	(K _i – K _{cp.}) ²
1	4,2529	-0,1288	0,0166
2	3,8218	0,3023	0,0914
3	4,5211	-0,3970	0,1576
4	4,1571	-0,0330	0,0011
5	3,8889	0,2352	0,0553
6	4,2337	-0,1096	0,0120
7	3,4962	0,6279	0,3943
8	4,7414	-0,6173	0,3811
9	4,0038	0,1203	0,0145
	Среднее: 4,1241		Сумма: 1,1238

Средняя квадратическая погрешность для данного эксперимента составила 0,3748.

В следующей серии экспериментов испытания проводили с большими пластинами размером 80х30х8 мм – стальными и биметаллическими. Пластины были окрашены со всех торцов и с одной плоскости. Образцы были помещены в стаканы так, чтобы неокрашенная сторона пластины была обращена к лопасти мешалки, для обеспечения интенсивного омывания поверхности пластины водой.

Первый в этой серии эксперимент проводился при начальном pH = 6,6 без ингибитора коррозии. Общая длительность эксперимента составила 3 часа (цикл из трех шагов по 1 часу).

Второй эксперимент проводился при следующих условиях: начальное значение pH = 2,3; ингибитор коррозии – PuroTech 48; доза ингибитора – 500 мг/дм³. Общая длительность эксперимента – 6 часов (цикл из четырех шагов: первый – 1 час, второй – 3 часа, два последующих – по 1 часу).

Третий эксперимент проводился при начальном pH = 4,2 без ингибитора коррозии. Общая длительность эксперимента составила 4 часа (цикл из четырех шагов по 1 часу).

Обобщенные результаты исследований коррозионного износа больших стальных и биметаллических пластин приведены в таблице 4 и на рисунке 3. Поскольку предыдущие исследования показали, что интенсивность коррозии незначительно зависит от дозы ингибитора, в табл. 4 доза ингибитора не указана.

Таблица 4. Результаты экспериментов по изучению коррозионного износа стальных и биметаллических пластин

Вид, материал пластины	Вид ингибитора	Начальное pH	Скорость коррозии, г/м ² ·ч	Коррозионное проникновение, мм/год	Снижение кор. проникновения биметалла, раз
Сталь 3	PuroTech 48	2,3	6,0000	6,7385	3,4
Биметалл	PuroTech 48	2,3	1,6267	2,0070	
Сталь 3	–	4,2	3,9008	4,8129	5,0
Биметалл	–	4,2	0,7879	0,9721	
Сталь 3	–	6,6	3,3063	3,7132	22,9
Биметалл	–	6,6	0,1317	0,1625	

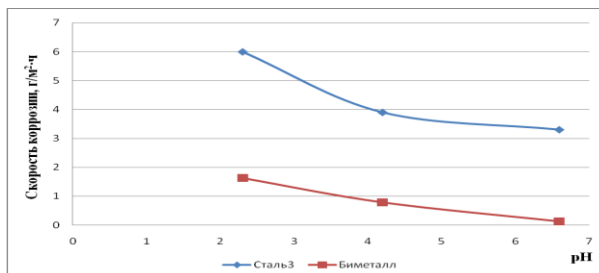


Рисунок 3 – Швидкість корозії великих пластин при різних pH

Висновки

Дослідження показали, що спостерігається очевидне переваження застосування пластин з біметалу порівняно з застосуванням пластин з сталі марки Ст.3. В середі, близькій до нейтральної ($\text{pH} = 6,6$), показники всіх характеристик корозійного зносу (швидкість корозії, корозійне проникнення) відрізняються в $22 \div 23$ рази, в слабкокислому середі ($\text{pH} = 4,2$) – в $4 \div 5$ раз. В кислому середі ($\text{pH} = 2,3$) переваження біметалічних пластин менше: показник корозійного проникнення у біметалу в 3,4 рази нижче, ніж у сталі Ст.3.

На основі проведених досліджень можна утверджувати, що біметалічні листи SWIP є стійким до корозії матеріалом. Їх застосування для виготовлення апаратів газоочистки в декілька раз знизить корозійний знос газоочисного обладнання в слабкокислому або близькій до нейтральної середі, що дозволить суттєво збільшити термін його служби і скоротити експлуатаційні витрати.

1. Розробка технічних рішень і уточнення водно-хімічних режимів оборотних циклів електromеталургічного виробництва для забезпечення їх роботи в безсточному режимі з урахування змін якості підпиточної води // Звіт про НДР НПО «Енергосталь». Рук. Гончарова, арх. № 03150, 1992 г.
2. Дослідження по оцінці корозії з допомогою індикаторних пластин в системі охолоджуючої води цеху окомковання ОЗМК // Звіт про НДР. – Харків, 1993 г. – 11 с.

Кондратенко А. І., Камуз А. М.

Дослідження корозійної стійкості біметалевих листів SWIP з метою визначення можливості їх використання для виготовлення апаратів газоочистки

Представлені результати досліджень корозійної стійкості зразків, виготовлених зі сталі марки Ст. 3 і з біметалічного матеріалу. Наведено опис лабораторної установки. Проведено порівняння встановлених характеристик, що

підтверджують доцільність застосування біметалу для виготовлення апаратів газоочисток.

Ключові слова: корозія, апарати газоочистки, біметал, сталь Ст. 3, швидкість корозії, корозійне проникнення

Kondratenko A. I., Kamuz A. M.

Investigation of corrosion resistance of SWIP bimetallic sheets in order to determine the possibility of their use for the manufacture of gas cleaning machines.

Results of investigation of corrosion resistance of metal samples made of steel St3 and bimetallic material are given. There is a description of the laboratory plant and comparative analysis of corrosion wear of steel and bimetal. Expedience of bimetal use for manufacturing gas cleaning apparatus was provided.

Key words: corrosion, apparatus for gas cleaning, bimetal, steel 3, the rate of corrosion, corrosion penetration

UDC 669.14.294.014:004.9

A.V. Zhadanos¹(Ph.D), I.V. Derevyanko¹(Ph.D), D.O. Chaika²

DEVELOPMENT THE AUTOMATED INFORMATIONAL SYSTEM OF LADLE-FURNACE FOR PREDICTION THE CONTENT OF ALLOYING ELEMENTS IN STRUCTURAL STEEL¹

1 - National Metallurgical Academy of Ukraine, department of electrometallurgy, (Dnipro)

2 - Metallurgical Plant Dneprosteel LLC (Dnipro, Ukraine)

Regression models of silicon, manganese and carbon content behavior in metal depending on the amount of added carbonaceous materials, silicomanganese SiMn17, ferrosilicon FeSi65 are obtained as a result of analysis the experimental data for structural steel. These models enable to forecast the chemical composition of melting steel in order to save reducing agents and alloying elements. The structural diagram of automated information system of ladle-furnace is designed according to results of investigations.

Keywords: ladle furnace, structural steel, prediction of chemical composition, regression model, adequacy of model, automated informational system (AIS)

Introduction. The permanently increase of requirements to quality of smelted steel causes the widespread introduction of secondary metallurgy. One of the main facilities of secondary metallurgy is a ladle-furnace, which is designed for desulphurization, alloying, deoxidizing metal and heating it to subsequent process steps.

The most important problem at the stage of structural steel treatment on the ladle-furnace is to provide stable regulated chemical composition of metal and rational charge of alloying and reduction alloys when steelmaking. According to current technology, at ladle-furnace treatment the chemical composition of steel is controlled only by mechanical sample taking and subsequent analysis in the laboratory. Therefore it is important to have data about element concentration behavior in the processed metal and to define the rational charge of alloying and reduction alloys based on these results. One of areas of this problem solution is working out of mathematical model for forecasting the final content of elements in the melt. There are two types of models that characterize the content behavior of chemical elements in metal during steel out-of-furnace treatment: physic-chemical based on thermo chemistry and thermo kinetics laws and regression models.

Retrospective of researches and publications. The advantage of the first models is a high accuracy of forecast [1, 2], but structural of such models needs rather complicated calculations. At the same time, actual values of counted magnitudes do not coincide with theoretical ones which require their subsequent correction based on obtained experimental data. Regression models are less accurate, however it is possible to obtain data meeting the requirements to forecasting steel chemical composition at their application [3]. Regression models of Cr, Si, Mn and C contents behavior in bearing steel depending on the amount of added alloying and reduction alloys (carbonaceous materials, ferrosilicomanganese SiMn17, ferrosilicon FeSi65, ferrochromium FeCr800) during treatment in ladle-furnace are obtained [4]. Given the fact that the requirements for the content of alloying elements in structural steels are in a rather wide range, for example the steel for railway wheels contains according to standard GOST (interstate standard for Commonwealth of Independent States) 10791-2004 (0,55-0,65% C; 0,5-0,9% Mn; 0,22-0,45% Si [5]) it is reasonable to develop the regression models of alloying element content change in the process of structural steel treatment on the ladle-furnace in order to save reduction alloys and alloying ferroalloys.

Development of regression models. The following materials are used for reducing and alloying of wheel steel: ferrosilicon of grade FeSi65 (63-68% Si) DSTU (state standard of Ukraine) 4127-2002 [6], silicomanganese SiMn17 (Mn 65%, 15-20% Si) DSTU 3548-97 [6] and carbon in the form of electrode breakage. Data of industrial smelting operations are processed by following parameters in order to construct regression models:

- weight of metal in the ladle $M_{\text{melt}} = 105\text{-}115$ tons;
- content of Si, Mn, C in metal-semiproduct prior to ladle-furnace treatment;
- weight of ferrosilicon FeSi65, silicomanganese SiMn17, carbon, kg - m_{FeSi65} , m_{SiMn17} , m_{C} ;

- content of Si, Mn, C in steel upon completion of ladle-furnace treatment, %: $[Si]_{fin}$, $[Mn]_{fin}$, $[C]_{fin}$;
- change of Si, Mn, C content in steel according to results of ladle-furnace treatment, %: $\Delta[Si]$, $\Delta[Mn]$, $\Delta[C]$.

Data of 28 smelting operations of wheel steel are approximated by linear regression equations using personal computer [7]. The following model is suggested for estimation of silicon content change:

$$\Delta[Si] = a_1 \cdot m_{FeSi65} + a_2 \cdot m_{SiMn17} + a_3, \quad (1)$$

where $a_1 = 3.2 \cdot 10^{-4}$, $a_2 = 12.6 \cdot 10^{-5}$, $a_3 = 0.039$ - equation factors, $[Si]$ - silicon content when current melt alloying. Determinacy factor r^2 of developed model is 0.82 and absolute accuracy of forecast – 0.06 % (figure 1).

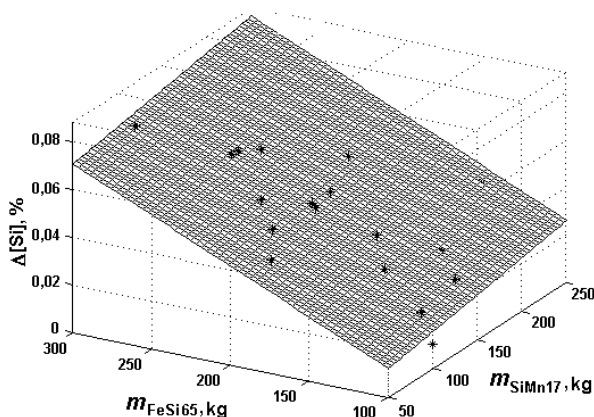


Figure 1 – Dependence of Si content change in structural steel for railway wheels during ladle-furnace treatment on specific charge of m_{FeSi65} and m_{SiMn17} : points - rated values of smelting operations, plane – obtained model

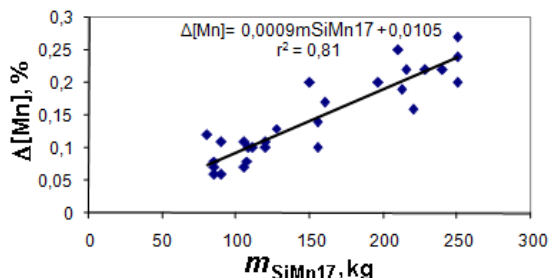


Figure 2 – Dependence of Mn content change in structural steel for railway wheels during ladle-furnace treatment on specific charge $m_{\text{MnCl7}_{\text{sp}}}$: points - rated values of smelting operations, plane – obtained model

Regression model of manganese (figure 2) and carbon content change (figure 3) is obtained in a similar way. The models have determinacy factors r^2 are 0.81 and 0.73 accordingly. The absolute accuracy of forecast for [Mn] is 0.05 % and for [C] is 0.03%. It complies with the requirements for models.

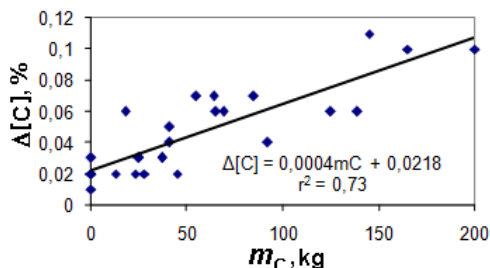


Figure 3 – Dependence of C content change in structural steel for railway wheels during ladle-furnace treatment on specific charge of carbon materials: points - rated values of smelting operations, plane – obtained model

The block diagram of the automated information system. To implement the developed models proposed automated information system (AIS) as a part of the observable automated control system of ladle-furnace (Fig. 4) [8].

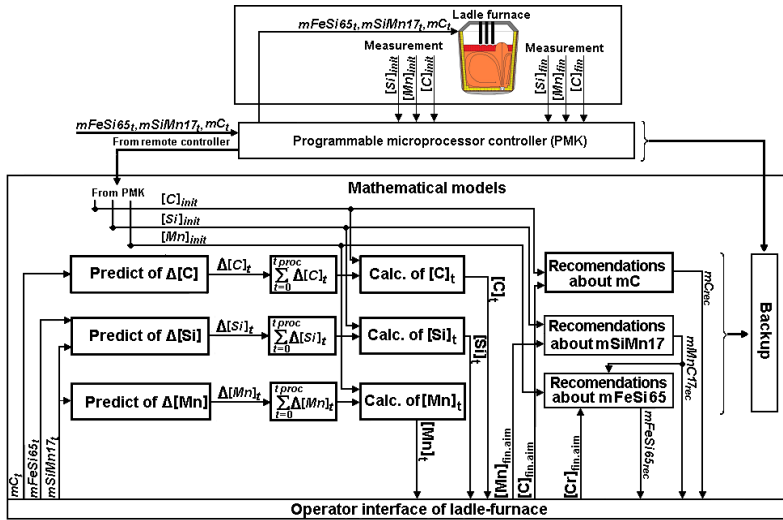


Figure 4 – The block diagram of an automated information system for monitoring the chemical composition of structural steel for railway wheels during processing in ladle-furnace based on developed models

The main purpose of AIS is to give the operator at the control panel the current content of carbon ($[C]_t$), Si ($[Si]_t$), Mn ($[Mn]_t$) in the metal during ladle-furnace treatment and recommendations about quantity of chemical additives, which necessary to add in the melt C (m_{Crec}), FeSi65 ($m_{FeSi65rec}$), SiMn17 ($m_{SiMn17rec}$). AIS consists of the following subsystems: "predict of $\Delta[C]$ "; "predict of $\Delta[Si]$ "; "predict of $\Delta[Mn]$ "; "calc. of $[C]_t$ "; "calc. of $[Si]_t$ "; "calc. of $[Mn]_t$ ". "Recommendations about mSiMn17"; "Recommendations about mFeSi65", "Recommendations about mC". The input parameters of the system are: $[Si]_{init}$, $[Mn]_{init}$, $[C]_{init}$, (the results of measurements enter to the system of mathematical models through a programmable microprocessor controller); the amount, time and kind of added to the melt chemical additives, m_{Ct} , m_{FC65t} , m_{MnCl7t} , the aim values of content Si, Mn, C - $[Si]_{fin.aim}$, $[Mn]_{fin.aim}$, $[C]_{fin.aim}$, (setting by the operator PPC). The above mentioned input and output subsystems' parameters, together with the results of the intermediate measurements additionally transferred to the subsystem "Backup". In case of technological changes of ladle-furnace process, the availability of subsystem "Backup" allows to perform

automatic correction of model coefficients, embodied in the subsystems of automated information system. AIC is realized by integrating into existing process control system industrial computer with developed mathematical models.

Conclusions

1. Developed regression models of alloying elements content change in the process of structural steel for railway wheels treatment using ladle-furnace enable to forecast the concentration of Si, Mn and C in steel.

2. The structural diagram of AIS is made for implementation in the automation control system of secondary steelmaking. The main purpose of the system is monitoring of steel chemical composition and to issue the recommendations about the rational amount of alloying and reducing alloys.

1. Prediction the composition of steel melts during smelting and secondary treatment. S.V. Kazakov. *Metal i Litye Ukrainy*, 2005, No. 3-4, pp. 17-20. (Published in Russian)
2. *Snegirev, Yu.V., Tutarova, V.D. and Fedorova, A.A.* Using artificial neural network to predict steel chemical composition during secondary treatment in ladle furnace. *Software of systems in the industrial and social fields*. 2014. - №1. p. - 41-48. (Published in Russian)
3. *Vihlevschuk V. A.* Ladle finishing of steel / *V.A. Vihlevschuk, V.S. Kharakhulakh, S.S. Brodsky.* – Dnepropetrovsk: SSPC “System Technology”, 2000 – 190 p. (Published in Russian)
4. *A.V. Zhadanos, M.I. Gasik A.I. Panchenko, A.S. Sal'nikov, L.M. Skripka.* Mathematical Model of Roller-Bearing Electric Steel Chemical Composition Control on the Ladle-furnace. *Metallurgical and Mining Industry*, 2010, Vol. 2, No. 6 – p.p. 390-396.
5. Solid-rolled wheels. Specifications: GOST 10791-2011. – Moscow: The Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2011. – 10 p. (Published in Russian)
6. *M. I. Gasik, N. P. Lyakishev.* Physical-chemical and technology of electrical ferroalloys, Dnepropetrovsk, System Technologies, 2005, 448 p. (Published in Russian).
7. *Kukushkin O. N.* Statistics in Excel / *O.N. Kukushkin, S.V. Beitcun, A.V. Zhadanos* - Dnepropetrovsk: National metallurgical academy of Ukraine, 2002. - 64 c. (Published in Russian).
8. *Zhadanos Oleksandr, Derevyanko Ihor.* Development the mathematical models for prediction the content of alloying elements in structural steel during ladle-furnace process. *Central European Researchers Journal*, Vol. 2, Issue. 1, 2016 – pp. 16-21.

А. В. Жаданос, И. В. Деревянко, Д. О. Чайка

Разработка автоматизированной информационной системы печников для прогнозирования содержания легирующих элементов в структуре стали.

По результатам промышленных экспериментов и последующей обработки экспериментальных данных для конструкционной стали получены регрессионные модели динамики содержания кремния в металле в зависимости от количества введенных углеродосодержащих материалов, ферросиликомарганца MnC17, ферросилиция ФС65 на установке ковш-печь, что позволяет прогнозировать химический состав стали по этим элементам. По результатам исследований разработана структурная схема автоматизированной информационной системы агрегата ковш-печь.

Ключевые слова: установка ковш-печь, конструкционная сталь, прогнозирование химического состава, регрессионная модель, адекватность модели, автоматизированная информационная система

А. В. Жаданос, И. В. Деревянко, Д. О. Чайка

Розробка автоматизованої інформаційної системи печі-ківш для прогнозування вмісту легуючих елементів в структурі сталі.

За результатами промислових експериментів і наступної обробки експериментальних даних для конструкційної сталі отримані регресійні моделі динаміки вмісту кремнію в металі в залежності від кількості введених вуглецьвміщуючих матеріалів, феросилікомарганцю MnC17, феросиліцію ФС65 на установці ківш-піч, що дозволяє прогнозувати хімічний склад сталі за цими елементами. За результатами досліджень розроблена структурна схема автоматизованої інформаційної системи агрегату ківш-піч.

Ключові слова: установка ківш-піч, конструкційна сталь, прогнозування хімічного складу, регресійна модель, адекватність моделі, автоматизована інформаційна система (АІС).



Co-funded by the
Tempus Programme
of the European Union

This publication is the result of the project implementation:
TEMPUS CERES: Centers of Excellence for young REsearchers.
Reg.no.544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES



УДК 669.162.252+628.179.2

Я. А. Чепракова, Ю. А. Шляхова, В. В. Алхасова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН КОРРОЗИИ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТКИ
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 9 МЕТКОМБИНАТА «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ
РОГ»**

*Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр
металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков*

Представлены результаты исследований коррозии аппаратов газоочистки доменной печи № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Установлены причины

коррозии, заключающиеся в уменьшении pH воды в узлах газоочистки по сравнению с pH общего стока.

Ключевые слова: коррозия, аппараты газоочистки доменных печей, pH воды, щелочность воды, диоксид углерода

Постановка проблемы. До недавнего времени работа аппаратов газоочисток доменных печей осложнялась в результате образования плотных солевых отложений, состоящих преимущественно из карбоната кальция.

Причиной образования отложений в аппаратах газоочистки был вынос пыли, содержащей значительные концентрации щелочных компонентов. В 60-х годах положение изменилось. В аппаратах газоочисток были обнаружены следы коррозионного износа. Это было связано с усовершенствованием технологии выплавки чугуна, заключающимся, прежде всего, в переводе шихты, загружаемой в доменную печь, на 100 %-ный агломерат, что повышает содержание диоксида углерода в доменном газе, и в повышении давления газа под колошником, что приводит к повышенному содержанию углекислоты в воде в связи с увеличением парциального давления диоксида углерода (CO_2) в колошниковом газе. В связи с этим, вопрос изучения причин коррозии аппаратов газоочисток доменных печей приобрел особую актуальность.

На ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (ПАО «АМКР») в аппаратах очистки доменного газа за доменной печью №9 (ДП-9) цеха №2 с 2014 г. происходит интенсивная коррозия аппаратов газоочистки. В частности, коррозии подвержены трубы Вентури, выполненные из Стали 3, в то время как в скруббере, выполненном из нержавеющей стали, коррозия не наблюдается. На аналогичных газоочистках за доменными печами №№ 6 – 8 цеха №1 коррозия также не наблюдается.

Условия работы газоочистки ДП-9 отличаются от тех, в которых находятся газоочистка доменных печей – 7, 8. Во-первых, водоснабжение газоочистки печей – 7, 8 осуществляется из пруда-осветлителя (в пруд-осветлитель также поступает вода от мартеновского, конвертерного и агломерационного цехов), тогда как для газоочистки ДП-9 был создан отдельный оборотный цикл. Это привело к тому, что вода, подаваемая на газоочистку ДП-9, отличается по химсоставу от воды, подаваемой на газоочистки других доменных печей комбината. Изменился также состав шихтовых материалов, что также оказало влияние на изменение химсостава воды, подаваемой на газоочистку.

Изложение основных материалов исследования. Обычно при определении возможных причин коррозии исследуют химсостав воды до и после газоочистки. Однако, как будет показано ниже, этого

недостаточно. Для выяснения причин коррозии необходимо определить химсостав воды после отдельных ступеней газоочистки.

Схема водоснабжения газоочистки ДП-9 приведена на рис. 1.

При проведении исследований выбраны следующие точки отбора:

- вода, поступающая на газоочистку (на скруббер, трубы Вентури, дроссельную группу и каплеуловители, точка 1);
- вода после скруббера и труб Вентури, точка 2 (в условиях газоочистки ДП-9 не было возможности осуществить отбор проб раздельно после скруббера и после труб Вентури);
- вода после каплеуловителей и дроссельной группы, точка 3;
- общий сток после газоочистки, точка 4.

Результаты исследований приведены в таблице 1.

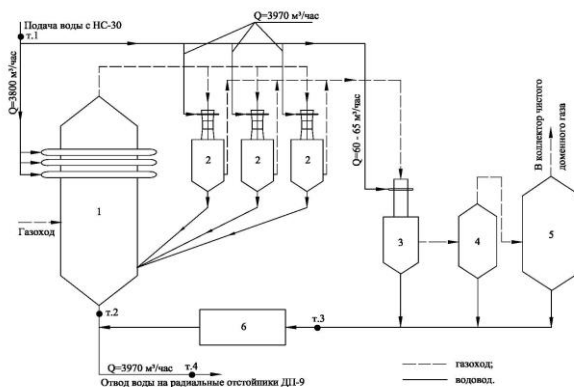


Рисунок 1 – Принципиальная схема газоочистки ДП-9:

- 1 – скруббер; 2 – труба Вентури (3 шт); 3 – дроссельная группа;
4,5 – каплеуловители; 6 – шламовая насосная станция

Во время обследования вода оборотного цикла ДП-9 периодически подщелачивалась гидроксидом натрия (каустическая сода) в течение 8 часов в сутки, кроме выходных дней. Если в течение длительного времени подщелачивание воды не осуществляется, то pH осветленной воды, подаваемой на газоочистку, снижается до $\text{pH} = 5,0$, а после газоочистки – $\text{pH} = 3,5$. Поэтому подщелачивание воды необходимо. Но даже и при подщелачивании в режиме, который имел место в тот период, вода, подаваемая на газоочистку, сохраняет слабокислую реакцию. Из таблицы 1 следует, что pH воды после каплеуловителей значительно меньше, чем после скруббера и в целом после газоочистки. Понижение pH в значительной мере определяется растворением в воде диоксида углерода CO_2 , который содержится в доменном газе в среднем в количестве 20 % общего объема.

Таблица 1. Средние данные по химсоставу воды до, после газоочистки и после отдельных ступеней газоочистки ДП-9

Место отбора пробы	pH	Щелочность, мг-экв/дм ³		Жесткость, мг-экв/дм ³		Сульфаты, мг/дм ³	Хлориды мг/дм ³	t, °C
		ф/ф	общ	Ca ²⁺	общ.			
Перед газоочисткой	6,29	0,0	1,34	18,5	21,41	370,62	699,20	31,0
Конус скруббера	4,76	0,0	0,95	19,6	22,78	438,13	737,04	31,5
После каплеуловителя	4,17	0,0	0,31	19,9	23,18	567,00	1042,76	31,0
На выходе из газоочистки	4,66	0,0	0,98	19,5	22,31	422,09	828,63	35,0

Согласно закону Генри [1], количество газа C_{Γ} , растворившегося в воде при продолжительном контакте с ней, пропорционально парциальному давлению P_{Γ} газа над поверхностью воды, т.е.

$$\frac{C_{\Gamma}}{P_{\Gamma}} = K_{\Gamma}, \quad (1)$$

где K_{Γ} – константа Генри. При этом, если газ взаимодействует с водой, то количеством растворенного газа считается масса газа, который не вступил в реакцию с водой.

При растворении в воде диоксида углерода CO_2 происходят следующие реакции:



Таким образом, в воде присутствуют одновременно CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , H^+ .

Известно, что концентрация H_2CO_3 составляет лишь незначительную часть растворенного в воде (но не прореагировавшего с водой) диоксида углерода. Поэтому в качестве концентрации диоксида углерода принимают величину:

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = [\text{CO}_2] = [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{ф}} + [\text{CO}_2]_{\text{ф}}. \quad (5)$$

где $[\text{CO}_2]_{\text{ф}}$ и $[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{ф}}$ – фактические концентрации CO_2 и H_2CO_3 в воде, моль/дм³.

Расчеты показывают, что при отсутствии начальной щелочности и полном насыщении воды диоксидом углерода, соответствующем объемному содержанию CO_2 в газе 20 %, pH может опуститься до 4,06, но

не ниже. Это соответствует концентрации H_2CO_3 в воде, равной $1\,018\text{ мг/дм}^3$, т.е. концентрации CO_2 равной 723 мг/дм^3 .

Определили, как уменьшится концентрация диоксида углерода при поглощении части его водой после контакта с газом. При расходе воды, равном $4\,000\text{ м}^3/\text{час}$, общее содержание CO_2 в газе уменьшиться на $723 \cdot 4\,000 = 2\,892\,000 \approx 2,9 \cdot 10^6\text{ г/час}$.

В то же время общее исходное содержание CO_2 в газе, поступающем на газоочистку при расходе $840\text{ тыс. нм}^3/\text{час}$ и объёмном содержании CO_2 , равном 20% , составляет

$$\frac{840\,000 \cdot 1\,000 \cdot 0,2 \cdot 44}{22,4} = 330 \cdot 10^6\text{ г/час}.$$

Таким образом, на первой ступени очистки – в скруббере – поглощается меньше 1% общего содержания диоксида углерода. На последующих ступенях (трубы Вентури, дроссельная группа, каплеуловители), в связи с малым расходом воды, масса поглощаемого диоксида углерода ещё меньше. Поэтому приближенно можно считать, что парциальное давление CO_2 во всех аппаратах газоочистки примерно одинаковое и соответствует объёмному содержанию диоксида углерода, равному 20% . Следовательно, в воде после каждой ступени очистки должно содержаться равное количество CO_2 (в мг/дм^3), и эти воды должны характеризоваться одним и тем же значением pH. Если, после дроссельной группы и каплеуловителей pH воды равно $4,17$, следует принять, что такой же показатель pH воды после труб Вентури, а также воды, которая выносится из скруббера в газопод, соединяющий скруббер с трубами Вентури. Но когда вода из скруббера и труб Вентури поступает в бункер, расположенный под скруббером, то за счет растворения в ней извести, находящейся в пыли, pH воды повышается, и повышается pH воды после газоочистки (в период проведения исследований – до $4,66$). Следовательно, данные о химсоставе воды, в частности о pH, только лишь после газоочистки в целом не дают полной картины того, что происходит в отдельных аппаратах, и в действительности склонность к коррозии в трубах Вентури и газопод, ещё большая, чем можно было бы ожидать на основании pH воды после газоочистки в целом. То обстоятельство, что из скруббера в газопод, соединяющий скруббер и трубы Вентури, выносится влага с низким значением pH, приводит к интенсивной коррозии газопода, особенно на внешних участках поворотов, а низкое значение pH в воде после труб Вентури приводит к коррозии этого узла газоочистки.

Однако, несмотря на то, что содержание диоксида углерода в воде значительно меньше предельного, pH воды в отдельных пробах опускается ниже $4,06$, достигая $3,6 - 3,8$. Это дает основание предположить, что, кроме диоксида углерода, в газе содержится компонент, (предположительно серосодержащий), который переходит в

воду и подкисляет её. Об этом свидетельствует, наряду с понижением pH воды после скруббера и особенно каплеуловителя (до 3,6 – 3,8), также то, что pH воды, подаваемой на газоочистку, составляет 6,3. Обратный цикл газоочисток ДП-9 подпитывается водой, которая характеризуется водородным показателем равным 8,6 и щелочностью $\sim 1\text{мг-экв/дм}^3$. Если бы низкое значение pH было обусловлено только растворением диоксида углерода и образованием угольной кислоты, то за пределами газоочистки при низком парциальном давлении CO_2 в воздухе и особенно при разбрызгивании воды на градирне избыточный диоксид углерода должен был бы улетучиться, а показатель pH должен был бы увеличиться до 7,5 – 8,5. Следовательно, в газе (кроме CO_2) присутствует еще некоторый компонент, который подкисляет воду.

Выводы

1. Определены химсоставы воды, подаваемой на газоочистку, и воды после газоочистки. Впервые для газоочисток доменных печей Украины определен химсостав воды после отдельных ступеней газоочистки. Установлено, что после каплеуловителя $\text{pH}_{\text{ср}} = 4,17$. Обоснован вывод о том, что такое же значение pH характерно для воды после труб Вентури и воды, выносимой из скруббера в газопровод, соединяющий скруббер с трубами Вентури. Это вызывает интенсивную коррозию упомянутых узлов газоочистки.

2. Химсоставы воды в системах водоснабжения газоочисток ДП №9 и ДП № 7, 8 идентичны, за исключением уровней pH и щелочности. Следовательно, причиной интенсивной коррозии узлов газоочистки ДП № 9 являются низкие значения pH воды после отдельных узлов газоочистки, что обусловлено невысоким значением этого показателя у воды, подаваемой на газоочистку.

3. Из результатов расчета следует, что значения pH воды, прошедшей после контакта с доменным газом через трубы Вентури, и воды, выносимой из скруббера в газопровод, равны значению pH воды после каплеуловителя, которое значительно ниже водородного показателя воды после газоочистки в целом. В ряде случаев значение pH воды опускалось ниже 4,06, что может свидетельствовать о присутствии в газе (наряду с CO_2) других подкисляющих агентов.

1. Глинка Н.Л., Общая химия: Учебное пособие для вузов. – 23-е изд., испр./ Под ред. В.А. Рабиновича. – Л.: Химия, 1983. – 704 с.:ил.

Я. А. Чепракова, Ю. А. Шляхова, В. В. Алхасова

Дослідження причин корозії апаратів газоочистки доменної печі № 9 меткомбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Представлені результати досліджень корозії апаратів газоочистки доменної печі № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Встановлено причини корозії, які полягають у зменшенні рН води в вузлах газоочистки в порівнянні з рН загального стоку.

Ключові слова: корозія, апарати газоочистки доменних печей, рН води, лужність води, діоксид вуглецю

Ya. A. Cheprakova, Yu. A. Shlyakhova, V. V. Alkhasov

Investigation of the causes of corrosion of blast furnace gas purification machines № 9 of PJSC «ArcelorMittal Kryviy Rih»

Results of corrosion investigation in gas cleaning plants of blast furnace No. 9 at PJSC «ArcelorMittal Kryviy Rih» are given. It is determined that corrosion caused by reduction of water pH in gas cleaning units in comparison with pH of total flow.

Keywords: corrosion, blast furnace gas cleaning apparatus, pH of water, alkalinity of water, carbon dioxide

УДК 669.14.018.295:620.192

С. І. Губенко, І. О. Нікульченко

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВПЛИВУ НА КОГЕЗИВНУ МІЦНІСТЬ МІЖФАЗНИХ МЕЖ ВКЛЮЧЕННЯ-МАТРИЦЯ СТАЛІ

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Досліджено вплив лазерної обробки на механізм формування мікроруйнувань на межах включення-матриця під час пластичної деформації ряду сталей. Показано, що вона сприяє підвищенню когезійної міцності цих меж в залежності від енергії і часу імпульсу та температури і швидкості деформації.

Ключові слова: сталь, границя включення-матриця, лазерна обробка, міцність, пластична деформація

Вступ. Відомо, що неметалеві включення є причиною утворення дефектів зміцненого шару під час лазерної обробки [1, 2]. Встановлено також, що попередня лазерна дія чинить вплив на поведінку неметалевих включень під час пластичної деформації в умовах навантаження під час експлуатації [1]. Метою роботи є виявлення впливу режиму лазерної дії на механізм та параметри утворення мікроруйнувань уздовж міжфазних меж включення-матриця сталі під час деформації при підвищених температурах.

Матеріали і методики. Зразки низьковуглецевих сталей 08кп, 08Х, 08Т, 08Ю, а також колісної R7, рейкової НБ-57, підшипникової сталі ШХ15 з полірованою поверхнею піддавали лазерній обробці на установці ГОС-30М при енергії імпульсу $W_{\text{імп}}$ 10, 18, 25 і 30 Дж. Швидкість нагрівання складала 10^5 °C/s, час дії імпульсу $\tau_{\text{час}} = (1,0, 2,5, 3,6, 4,2$ і

$6,0 \cdot 10^{-3}$ s, швидкість охолодження - 10^6 °C/s. При дослідженні утворення мікроруйнувань зразки сталей піддавали розтягненню у вакуумі при температурах 1000...1250 °C на установках Інстрон-1195 та ІМАШ-5С-65 з швидкостями переміщення захватів $V_1 = 800$, $V_2 = 1680$ и $V_3 = 2000$ mm/min.

Результати досліджень та їх обговорення. Як було встановлено раніше [1], поблизу усіх видів включень після лазерної дії та механічного навантаження спостерігали локалізацію деформації, яка привела до утворення мікроруйнувань. Відомо, що для багатьох включень при розтягненні характерно утворення порожнин (в'язких тріщин) шляхом розшарування уздовж міжфазних меж включення–матриця [1]: оксидів в сталях 08Ю, 08кп, 08Х, деяких сульфідів і сульфідних евтектик в сталях НБ-57, ШХ15, 08Ю. У той же час для включень оксидів, нітриду та карбонітрицу титану в сталі 08Т, силікатів в сталі 08Ю більш характерно утворення крихких тріщин в їх тілі. Після пластичної деформації без попередньої лазерної доброби поблизу включень Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, залізо-марганцевих сульфідів виникли порожнини, що представляють собою в'язкі тріщини (рис. 1, а, б). За наявності залізо-марганцевих силікатів незалежно від ступеня їх пластичності в них виникали крихкі тріщини (рис. 1, в). При температурах плавлення легкоплавких сульфідних евтектик в сталі формувалися заповнені розплавом порожнини, від яких розвивались тріщини (рис. 1, г).

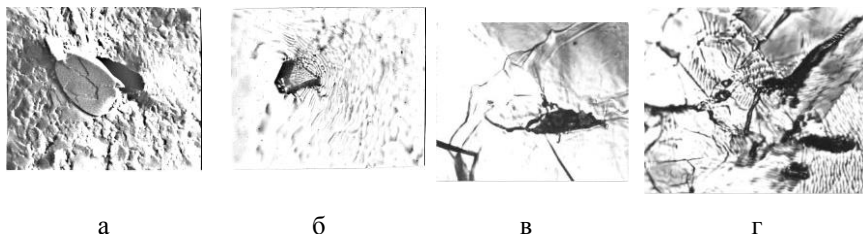


Рисунок 1 – Включення $MnO \cdot Al_2O_3$ в сталі 08Ю (а), $FeS-(Fe,Mn)S$ в сталі НБ-57 (б), $MnO \cdot SiO_2$ в сталі R7 (в, г) після гарячої деформації без попередньої лазерної обробки; $\times 500$

Визначені критичні деформації ϵ_{cr} , при досягненні котрих виникали мікроруйнування поблизу включень без попередньої лазерної обробки (табл. 1).

Таблиця 1. Значення критичної деформації ϵ_{cr} , % для сталі R7 за різних температур і швидкості деформування

Включення, дефект, обробка	Температура деформації, °C								
	1000			1100			1200		
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, порожнини без ЛО	17	22	18	22	28	24	30	36	32
$(Fe,Mn)S$, порожнини без ЛО	24	29	25	28	33	30	8	14	10
$(Fe,MnO) \cdot SiO_2$ тріщини у включенні без ЛО	5	9	7	22	30	25	25	35	28
Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, крихкі розшарування на границях включення-матриця після ЛО, $W_{imp} = 25 \text{ J}$, $\tau_{imp} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}$	25	30	26	32	37	33	35	42	38
$(Fe,Mn)S$, крихкі розшарування на границях включення-матриця після ЛО, $W_{imp} = 25 \text{ J}$, $\tau_{imp} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}$	30	35	31	35	42	38	15	20	14
$(Fe,MnO) \cdot SiO_2$, тріщини у включенні після ЛО, $W_{imp} = 25 \text{ J}$, $\tau_{imp} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}$	14	22	16	25	37	30	29	42	35

Чим вище температура деформації, тим більша критична деформація ϵ_{cr} для усіх видів включень і мікроруйнувань. Але при плавленні сульфідів і силікатів значення ϵ_{cr} різко знижується внаслідок розвитку червоноламкості [1]. Виявлено вплив швидкості деформування (V_1 , V_2 , V_3) на величину ϵ_{cr} . При переході від V_1 до V_2 вона зростає внаслідок підвищення інтенсивності просковзування, яке сприяє деформаційному зміцненню міжфазних меж включення-матриця [1]; при переході від V_2 до V_3 величина ϵ_{cr} знову знижується через утруднення динамічних релаксаційних процесів на межах включення-матриця.

Поблизу включень оксидів Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$ і $MgO \cdot Al_2O_3$, сульфідів, сульфідних евтектик $FeS-FeO$ і $(Fe,Mn)S-FeS$, що не піддавалися ЛО, після гарячої деформації з'явилися порожнини (рис. 1, а, б). У той же час після ЛО біля усіх включень цих типів порожнин не виявили (рис. 2, а, в. при ступенях деформації до 30...35 %. Подальше підвищення ступеня деформації привело до утворення уздовж міжфазних меж тонких розшарувань, що представляють собою крихкі тріщини (рис. 2, в, г).

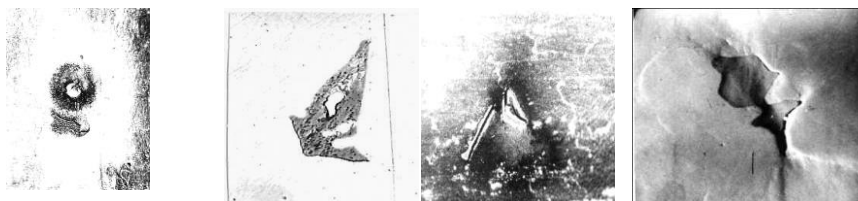


Рисунок 2 – Включення після ЛО і гарячої деформації сталі R7: а – $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; б – $\text{FeS}-(\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$; в, г – $(\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$; x500

На завершальних етапах деформації, що передують руйнуванню зразків, в матриці поблизу включень спостерігали тріщини, котрі були продовженням крихких розшарувань на міжфазних межах, або виникали поблизу включень внаслідок гальмування зсувів в сталій матриці. Розвиток цих тріщин приводив до макроруйнування зразків. Критична деформація, при досягненні якої виникали крихкі розшарування уздовж меж включення-матриця після попередньої лазерної обробки залежить від температури деформації (табл. 1). Значення ϵ_{cr} після лазерної обробки для усіх видів включень суттєво вищі, ніж без неї. Це пов'язано з впливом попереднього лазерного зміцнення меж включення–матриця.

Значення ϵ_{cr} зростають при усіх режимах лазерної дії, але найбільше при $W_{\text{imp}} = 18 \dots 25 \text{ J}$, що показує наявність оптимального інтервалу енергій та часу $\tau_{\text{imp}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ імпульсної лазерної дії, коли досягають зміцнення меж включення–матриця (табл. 2).

Таблиця 2. Значення ϵ_{cr} , % для різних типів включень в сталі R7 при швидкості деформування V_2 і температури 1100°C залежно від режиму лазерної обробки

$W_{\text{imp}}, \text{ J}$	$\tau_{\text{imp}} \cdot 10^{-3}, \text{ s}$	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{ MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$
10	1,0	30	34
	3,6	36	39
18	1,0	35	39
	3,6	39	45
25	1,0	37	42
	3,6	42	46
30	1,0	32	35
	3,6	36	39

Критичний розмір включень D оксидів, поблизу яких виникають крихкі розшарування, залежить від температури і суттєво зростає після ЛО. Розмір тріщин поблизу включень оксидів зменшується при підвищенні температури деформації, але при усіх температурах випробувань залишається вище, ніж швидкість зростання порожнин без

попередньої ЛО (табл. 3). Виключенням є швидкий рост дефектів у випадку плавлення включень в процесі гарячої деформації. Вплив режиму попередньої ЛТО на швидкість росту крихких розшарувань не виявлено, оскільки їх розвиток на межах включення–матриця практично не пов'язаний з розвитком деформації в оточуючій сталевій матриці і просковзування на цих межах, що свідчить про крихку природу цих тріщин.

Лазерна дія сприяє утворенню крихких тріщин та розшарувань уздовж меж включення–матриця, або зміні типу мікроруйнувань поблизу включень. Лазерна обробка призводить до того, що при гарячій деформації сталі відбувається стримання просковзування уздовж меж включення–матриця, хоча розшарування з'являються при вищих деформаціях, ніж порожнини у випадку відсутності лазерної дії. Тобто контактна взаємодія включень з матрицею в момент лазерної дії призводить до зміцнення меж включення–матриця і підвищення тріщиностійкості сталі. Існує інтервал енергії лазерного опромінення (18...25 Дж), який забезпечує максимальне лазерне зміцнення меж включення–матриця, що проявляється в зміні параметрів утворення крихких розшарувань при гарячій деформації. При гарячій деформації без попередньої ЛО процес просковзування уздовж меж включення–матриця передує в'язкому розшаруванню цих меж внаслідок утворення порожнин (в'язких тріщин). При цьому границя в'язко розділяється на береги порожнини, до яких у випадку пластичного включення або включення, що не деформується, докладаються зони просковзування та акомодатійної деформації у ділянках матриці (та у пластичному включенні). Таке сполучення пластичних процесів релаксації напружень в межах включення–матриця (просковзування та утворення в'язких тріщин) має природний вигляд в умовах гарячої деформації.

Таблиця 3. Вплив температури деформації на критичний розмір включень (D) та порожнин d_{void} або крихкого розшарування l_{brittle} з підвищенням ступеня деформації сталі R7

Включення, дефект	$t, ^\circ\text{C}$	$D, \text{мкм}$	$\varepsilon, \%$	Параметр дефекта, $D_{\text{void}}, l_{\text{brittle}}, \text{мкм}$	
				D_{void}	l_{brittle}
MnO·Al ₂ O ₃ , порожнина без ЛО	1000	11	10	3	-
			20	8	-
			40	12	-
	1100	12	10	12	-
	1200	15	10	19	-
MnO·Al ₂ O ₃ , крихке розшарування після ЛО,	1000	20	22	-	4
			30	-	16
			40	-	32

$W_{\text{imp}} = 25 \text{ J},$ $\tau_{\text{imp}} \cdot 10^{-3}, \text{ s}$	1100	25	22	-	6
	1200	30	22	-	6
FeS-(Fe,Mn)S, порожнина без ЛО	1000	15	10	3	-
			20	10	-
			40	18	-
	1100	18	10	4	-
			20	38	-
			40	50	-
	1200	20	10	28	-
FeS-(Fe,Mn)S, крихке розшарування після ЛО, $W_{\text{imp}} = 25 \text{ J},$ $\tau_{\text{imp}} \cdot 10^{-3}, \text{ s}$	1000	25	22	-	2
			30	-	20
			40	-	35
	1100	28	22	-	0
	1200	38	22	-	0

На рис. 3 показані схеми трансформації меж включення-матриця під час просковзування та руйнування після попередньої лазерної обробки, що обумовило формування складних композитних і градієнтних структур різних типів (рис. 3, а). [3].

Зони насичення матриці елементами включення та насичення елементами матриці у включенні відіграють зміцнюючу роль, оскільки такі складні локальні структури міжфазних меж та приграничних зон утруднюють процес просковзування і сприяють формуванню крихких мікроруйнувань як уздовж меж включення-матриця, так і у ділянках приграничних зон у зв'язку з їх структурною неоднорідністю незалежно від рівня пластичності неметалевого включення (рис. 3, б, в).

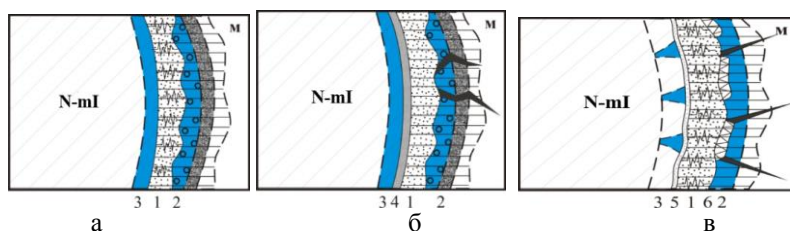


Рисунок 3 – Схеми трансформації меж неметалевого включення (нв)-матриця (м) під час просковзування та руйнування після попередньої ЛО [2]: 1 – межа включення-матриця, 2 – зона насичення матриці елементами включення, 3 – зона насичення елементами матриці у включенні, 4 – розшарування, 5 – сегрегація домішок, 6 – гранична фаза

Лазерна дія привела до своєрідної поведінки меж включення-матриця під час гарячої деформації. В їхній поведінці спостерігаються два процеси, а саме просковзування і крихке розшарування. Таке сполучення

процесів обумовлено швидкісним лазерним зміцненням меж включення-матриця, що проявляється у стримуванні просковзування та зародженні мікроруйнувань шляхом крихкої декогезії міжфазних меж, що призводить до затруднення формування в'язких тріщин, а після накоплення напружень в межах в результаті деформаційного зміцнення – до зміни утворення мікроруйнувань поблизу включень. Лазерна дія привела до формування міжфазних меж включення-матриця, що мають підвищену стійкість до деформуючих високотемпературних дій, а також спроможних ефективно розсіювати енергію, що підводиться зовні, в момент піка напружень за допомогою пластичної релаксації в результаті просковзування.

Висновки

Встановлено вплив температурно-швидкісного режиму деформування, а також енергії ($W_{\text{imp}} = 18 \dots 25 \text{ J}$) та тривалості дії ($\tau_{\text{imp}} \cdot 10^{-3}, \text{ s}$) лазерного імпульса на параметри утворення та розвитку розшарувань уздовж міжфазних меж включення-матриця. Визначено інтервал енергій лазерного опромінення, коли максимально відбувається зміцнення меж включення-матриця і підвищується тріщиностійкість сталі.

1. Губенко С. И., Парусов В. В., Деревянченко И. В. Неметаллические включения в стали. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
2. Денисенко О. І., Цоцко В. І., Спиридонова І. М., Пелешенко Б. Г. Формування поля температур тонкої стрічки під впливом на її поверхню дисперсної фази двофазного струменя. - Фізика і хімія твердого тіла. – Т.9. – № 4 (2008). –С. 901-904.
3. Губенко С. И. Зоны контактного взаимодействия в стальной матрице вблизи включений при лазерном воздействии. - Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – вип. 46. – №4. – с. 21-26.

С. И. Губенко, И. О. Никольченко

О возможности влияния на когезионную прочность межфазных границ включение-матрица стали.

Исследовано влияние лазерной обработки на механизм формирования микроразрушений на границах включения-матрица во время пластической деформации ряда сталей. Показано, что она способствует повышению когезионной прочности этих границ в зависимости от энергии и времени импульса и температуры и скорости деформации.

Ключевые слова: сталь, граница включения-матрица, лазерная обработка, прочность, пластическая деформация.

S. I. Gubenko, I. O. Nikulchenko

On the possibility of influencing the cohesive strength of the interphase boundaries of the inclusion-matrix of steel.

The influence of laser treatment on the mechanism of microcracks formation on inclusion-matrix boundaries under plastic deformation of some steels was investigated. It was shown that it promotes raise the cohesive strength of these boundaries in dependence on energy and time of pulse and also on the temperature and speed of deformation.

Key words: steel, inclusion-matrix boundary, laser treatment, strength, plastic deformation.

УДК 628.1.034.2:628.179.2:54

Ю.А. Шляхова, Я.А. Чепракова

СОКРАЩЕНИЕ СБРОСА ЗАГРЯЗНЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В РЕКУ ДНЕПР ИЗ ШЛАМОНАКОПИТЕЛЯ ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков

Предложена методика прогнозирования химсостава воды в оборотной системе предприятия, включающей шламонакопитель. Получены зависимости для определения компонентов химсостава воды (в т. ч. неконсервативных) химсостава воды после возврата ее части из шламонакопителя для подпитки системы. Выполнен прогноз химсостава воды для одного из металлургических предприятий Украины.

Ключевые слова: шламонакопитель, химсостав воды, расчет концентраций, самоочищающая способность водоемов

Постановка проблемы. В настоящее время на многих металлургических предприятиях имеются пруды-шламонакопители, которые являются неотъемлемым элементом системы водоснабжения и водоотведения. Эти пруды были созданы десятилетиями тому назад при преобладавших в те годы системах прямоточного водоснабжения с целью предотвратить вынос в водоем взвешенных веществ. Вопросы предотвращения химического загрязнения водоемов в то время не поднимались или стояли на втором плане. Как известно, прямоточное водоснабжение приводит к значительному потреблению свежей воды из источника – водоема (чаще всего из реки или моря) и к не менее значительному сбросу воды в водоем. В настоящее время, когда контроль за загрязнением водоемов проводится весьма жестко, наличие прямоточной системы водоснабжения на предприятии чревато для него возникновением экономических и экологических проблем.

Изложение основных материалов исследования. На одном из крупных меткомбинатов Украины ПАО «Запорожсталь» водоснабжение прокатных цехов осуществляется, в основном, по прямоточной схеме. Условно-чистые воды после охлаждения оборудования сбрасываются в

шламонакопитель. Сюда же поступают и загрязненные продувочные воды оборотных циклов газоочисток аглофабрик, доменных и мартеновских печей. Из шламонакопителя вода сбрасывается в р. Днепр. Обобщенная схема представлена на рис. 1.

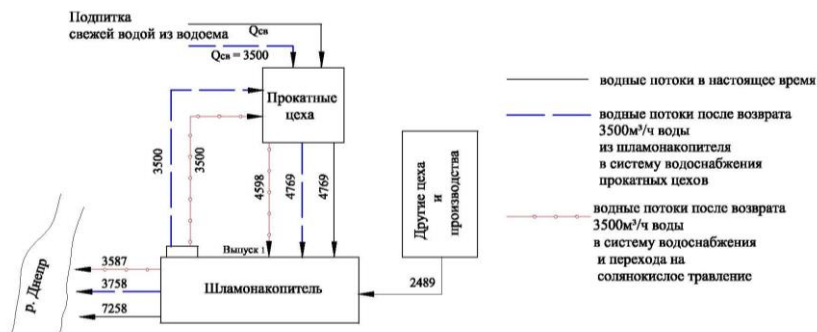


Рисунок 1 – Обобщенная схема водного баланса ПАО «Запорозжсталь»

Комбинатом было выдвинуто предложение: часть воды из шламонакопителя в количестве $3500\text{ м}^3/\text{ч}$ возвратить на подпитку системы водоснабжения прокатных цехов. При этом уменьшался бы сброс воды из шламонакопителя в водоем и на $3500\text{ м}^3/\text{ч}$ сокращалось бы также потребление свежей воды. Однако возврат части воды на повторное использование и сокращение сброса воды из шламонакопителя в р. Днепр может привести к тому, что концентрации солей и других загрязнений в воде, сбрасываемой в водоем, превысит ПДС. Кроме того, это может осложнить эксплуатацию охлаждаемого оборудования.

Целью данной работы был прогноз химсостава воды в шламонакопителе и в воде, подаваемой на охлаждение оборудования прокатных цехов, с тем, чтобы можно было оценить возможные осложнения в эксплуатации системы водоснабжения комбината. В ходе работы была разработана методика прогноза химсостава воды, получен ряд общих аналитических зависимостей для определения концентрации компонентов химсостава воды, сбрасываемой в водоем и подаваемой на охлаждение узлов и агрегатов прокатных цехов. Прежде всего, был составлен водный баланс поступления в шламонакопитель и сброса из него в водоем различных компонентов химсостава воды (по массе). Было учтено, что сбросы сточных вод от некоторых производств могут осуществляться периодически с различными интервалами в соответствии с периодичностью производственных процессов. Например, сброс

отработанных травильных растворов из травильных отделений прокатных цехов осуществляется один раз в 1÷2 недели или даже реже. В это время в общем стоке прокатных цехов может наблюдаться повышенное содержание кальция, железа и сульфатов (при серноокислом травлении) либо хлоридов (при соляноокислом травлении). В сточных водах ТЭЦ может наблюдаться повышение концентрации кальция, хлоридов и общего солесодержания во время сброса отработанных регенерационных растворов химводоочистки. В шламонакопителе происходит смешивание и усреднение сточных вод от различных производств. Поэтому было принято решение массу M сбрасываемых в пруд консервативных, т.е. неизменяемых компонентов (например, Cl^- , SO_4^{2-} , F , легких металлов) определять по их содержанию в сбросе из шламонакопителя в водоем:

$$M_i = C_{сбр1} \cdot Q_{сбр1}, \quad (1)$$

где $Q_{сбр1}$ – расход воды на сбросе из пруда в водоем в настоящее время, $m^3/ч$;

$C_{сбр1}$ – концентрация i -го компонента в сбрасываемых водах в настоящее время.

При возврате части воды в систему водоснабжения и уменьшении сброса в водоем на величину $Q_{возвр}$ сброс в водоем составит $(Q_{сбр1} - Q_{возвр})$. Масса i -го компонента, сбрасываемого в шламонакопитель, уменьшится на величину $\Delta M_i = C_{0i} \cdot Q_{возвр}$ (где C_{0i} – концентрация i -го компонента в свежей воде). Для концентрации i -го компонента в воде шламонакопителя, т.е. в воде, сбрасываемой в водоем, получено выражение:

$$C_{сбр2} = \frac{M_i - Q_{возвр} \cdot C_0}{Q_{сбр1} - Q_{возвр}} \quad (2)$$

Концентрация ряда компонентов за время пребывания в шламонакопителе может измениться. Например, двухвалентное железо может окислиться, образовав гидроксид трехвалентного железа, которое может выпасть в осадок; нитриты могут окисляться до нитратов. Вещества, уровень присутствия которых определяется биохимической или химической потребностью кислорода, также могут подвергнуться биохимическому окислению за счет самоочищающей способности шламонакопителя. Пусть масса $M_{инпос}$ i -го компонента, поступающего в шламонакопитель, за время пребывания шламонакопителе уменьшается до величины M_i , причем $M_i / M_{инпос} = K'_{ум} < 1$. С учетом этого для концентрации C_2 компонента химсостава, который будет иметь место после возврата части воды из шламонакопителя на повторное использование, получено выражение:

$$C_2 = \frac{M_{1i} - (Q_{\text{возвр}} \cdot C_0 \cdot K_{\text{ум}})}{Q_{\text{сбл}} - Q_{\text{возвр}} \cdot K_{\text{ум}}} \quad (3)$$

Полученные зависимости (1, 2, 3) были использованы при расчете химсостава воды, который будет иметь место после возврата 3500м³/ч из шламонакопителя в систему водоснабжения прокатных цехов (рис. 1). Результаты расчета приведены в таблице 1 и свидетельствуют о том, что

Таблица 1. Прогноз химсостава воды в гидросооружении и в системе водоснабжения прокатных цехов при возврате из шламонакопителя 3500м³/ч

Определяемые компоненты	Нормы ПДС на 2018г.	Р. Днепр (водоем)	При возврате 3500м ³ /ч и сохранении сернокислого травления			При возврате 3500м ³ /ч и переходе на солянокислотное травление		
			Масса компонентов, сбрасываемых в водоем	Концентрация компонентов в шламонакопителе и на выпуске в водоем	Химсостав воды в оборотном цикле при возврате 3500м ³ /ч воды из шламонакопителя в систему водоснабжения прокатных цехов	Масса компонентов, сбрасываемых в водоем	Концентрация компонентов в шламонакопителе и на выпуске в водоем	Химсостав воды в оборотном цикле при возврате 3500м ³ /ч воды из шламонакопителя в систему водоснабжения прокатных цехов
рН		7,9						
Щёлочность		2,5	14008,0	1,40	1,69	21096,0	3,44	3,22
Кальций	152,3	54,11	857932,9	177,90	144,96	492113,0	84,40	77,16
Магний	25,7	14,94	126318,7	19,70	18,43	126318,7	20,64	19,28
Железо общ.	0,92	0,143	21022,3	4,25	3,16	6442,00	1,30	1,02
Хлориды	93,71	27,55	482927,6	102,85	82,81	482927,6	107,75	88,60
Сульфаты	336,6	40,19	2316052,6	578,86	435,53	1180129	289,78	230,18
Нефтепродукты	0,27	0,024	2428,8	0,62	0,46	2428,8	0,54	0,42
Азот аммонийный	3,68	0,235	19074,6	4,86	3,63	19074,6	3,65	2,83
Нитриты	0,74	0,050	3156,06	0,79	0,60	3156,06	0,45	0,35
Нитраты	7,94	3,02	21917,60	3,02	3,02	21917,6	3,16	3,13
Роданиды	0,214		573,64	0,15	0,11	573,64	0,16	0,12
Фенол	0,0043		38,51	0,01	0,01	38,51	0,0056	0,0043
Фториды	2,28	0,332	11560,6	2,77	2,12	11560,6	2,90	2,29
БПК5	4,6	2,63	32629,8	6,23	5,28	32629,8	4,62	4,14
ХПК	35	20,57	244439,07	45,89	39,15	244439,0	44,30	38,63

Примечание. Показатель рН – безразмерная величина; щелочность воды указана в мг-экв/дм³, концентрации остальных компонентов – в мг/дм³.

концентрации компонентов превысят ПДС. С целью усовершенствования технологии на предприятии предполагается перейти на солянокислое травление и полную утилизацию отработанных травильных растворов. При этом будет исключен сброс отработанных серно кислотных растворов по выпуску 1 (171 м³/ч) и вместе с этим и уменьшится поступление в шламонакопитель сульфатов, кальция и железа (рис. 1). Результаты расчетов также приведены в таблице 1. При этом концентрации железа, нефтепродуктов, азота аммонийного, нитритов, фенола, БПК₅, ХПК определялись по ф-ле (3), поскольку было принято, что в связи с прекращением сброса кислых стоков и повышением щелочности, самоочищающая способность в шламонакопителе восстановится. Для этого случая $K_{ум} = e^{-kt}$, где t – фактическое время пребывания воды в водоеме, а k – коэффициент неконсервативности – был выбран для каждого вещества в соответствии с [1]. Но и с учетом самоочищающей способности шламонакопителя возможно превышение ПДС по хлоридам, нефтепродуктам, фторидам, ХПК и БПК₅.

Выводы и рекомендации

1. Разработана методика прогнозирования химсостава воды в оборотной системе предприятия, включающей существующий шламонакопитель.

2. Выполнен прогноз химсостава воды. Установлено, что при возврате части воды из шламонакопителя в систему водоснабжения прокатных цехов и уменьшении сброса воды в водоем концентрация загрязнений в воде, сбрасываемой в водоем, возрастет и по ряду показателей превышает ПДС.

3. На основании выполненного прогноза химсостава воды намечен ряд мероприятий, для улучшения работы системы при использовании воды из шламонакопителя: разведение в шламонакопителе высшей водной растительности и аэрация воды; усовершенствование устройства для улавливания нефтепродуктов в местах поступления их в сточные воды от прокатных станов; стабилизационная обработка воды, поступающей в узлы и агрегаты с высокой теплонагруженностью.

4. Разработанная методика позволит прогнозировать химсостав воды в оборотной системе других предприятий, правильно и четко подбирать методы улучшения работы систем оборотных циклов предприятий, что в дальнейшем исключит сброс загрязненных сточных вод в водный объект, сохранит водную экосистему и не приведет к негативным экологическим последствиям.

1. *Родзиллер И. Д.* Прогноз качества воды водоемов – приемников сточных вод. – М.: Стройиздат, 1984. – 263 с., ил. – (Охрана окружающей природной среды).

Ю. А. Шляхова, Я. А. Чепракова

Скорочення скидання забруднених стічних вод у ріку Дніпро зі шламонакопичувачів ПАТ «Запоріжсталь»

Запропоновано методику прогнозування хімічного складу води в оборотній системі підприємства, що включає шламонакопичувач. Отримано залежності для визначення компонентів хімічного складу води (в т. ч. неконсервативних) хімічного складу води після повернення її частини зі шламонакопичувача для підживлення системи. Виконано прогноз хімічного складу води для одного з металургійних підприємств України.

Ключові слова: шламонакопичувач, хімічний склад води, розрахунок концентрацій, здібність водойм до самоочищення

Yu. A. Shlyakhova, Ya. A. Cheprakova

Reduction of discharges of polluted wastewater to the Dnipro River from sludge ponds of PJSC "Zaporizhstal"

Technique for forecasting water chemical composition in circulating water supply systems of steel works using storage sludge ponds is proposed. Dependencies to identify components (including non-conservative) of water chemical composition after returning of its part from sludge pond to feed the system are obtained. Forecast of water chemical composition for one of steel works of Ukraine was carried out.

Keywords: *sludge ponds, chemical composition of water, calculation of concentrations, ability of reservoirs to self-purification*

УДК: 620.18: 621.771.22

Е. Г. Дёмина

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТРУБНЫХ И КОЛЁСНЫХ ЗАГОТОВКАХ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЛОТНОСТИ «СЛЕДОВ» ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

Разработан метод определения степени накопленной деформации в трубных и колёсных заготовках по изменению плотности «следов» дендритной структуры. Предложенный показатель прорабатываемости металла может быть использован в промышленных условиях для оптимизации режимов производства различных видов проката со сложными схемами деформирования.

Ключевые слова: дендритная структура, непрерывнолитые заготовки, трубные заготовки, железнодорожные колёса, степень накопленной деформации

Современное состояние вопроса. Исследование закономерностей распределения деформаций в процессах обработки давлением стальных изделий весьма актуально как для оптимизации собственно этих процессов с целью снижения производственных затрат, так и для повышения качества продукции [1]. Интенсификация режимов деформационной обработки является эффективным путём воздействия на такие показатели качества заготовок, как улучшение проработки сечения, уменьшение неравномерности деформации, получение мелкозернистой однородной структуры, повышение эксплуатационных свойств [2–7].

Анализируя различные виды обработки давлением, сочетание которых применяется при изготовлении трубных заготовок и цельнокатаных колёс, весьма важно установить степень проработки металла (величину деформации) на определённом этапе обработки. Имея представления о распространении деформации, можно судить о степени участия того или иного инструмента в рассматриваемом процессе, а также стремиться обеспечить наилучшую проработку металла по всему сечению металлопродукции. В связи с этим особый интерес представляет выбор методики определения распространения деформации вглубь заготовки, к центральной её зоне.

Анализ публикаций по теме исследования. Согласно выводам работы [8], сделанным на основании анализа существующих методов исследования деформации металла, приемлемой следует считать такую методику, которая позволяет определить степень прорабатываемости слитка, закономерности распределения деформации в объёме раската, характер уширения и продольного перемещения частиц металла. Наиболее полно эти вопросы раскрывает метод вставных стержней В.Л. Павлова [8]. В работах [9, 10] установлены факторы, влияющие на глубину распространения деформации, и закономерности формоизменения проката крупных сечений. Предложены относительные показатели для оценки степени «проработки» сечения и деформируемости стали [11]. Сделан вывод, что глубина распространения деформации зависит от марки стали, структуры металла, температуры прокатки и степени прогрева слитка по сечению. Однако перечисленные методы являются трудоёмкими и, практически, неосуществимыми в современных условиях производства. Они дают только интегральную оценку деформации без учёта особенностей течения металла и локальных деформаций в отдельных зонах литой заготовки.

Изучение деформации слитков в металловедческом аспекте [12] позволило дать определение термину «прорабатываемость», под которым понимается раздробление дендритной структуры в процессе деформации исходного слитка, и возможность по поведению неметаллических включений качественно и количественно судить о местных степенях

деформации. Несмотря на комплексный подход исследования, данный метод не является универсальным, поскольку его применение зависит от чистоты стали, распределения неметаллических включений в её объёме, места отбора образцов по сечению слитка и позволяет получить ограниченное количество значений измерений.

Формулирование цели и задач исследования. Цель данной работы заключалась в разработке универсального метода оценки деформационной проработки литых заготовок из углеродистых и низколегированных сталей.

Материал и методики исследования. Материалом для исследования были образцы непрерывнолитых и трубных заготовок Ø 250 и 180 мм, а также железнодорожных колёс Ø 927 и 957 мм производства ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» и ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ». Химический состав низколегированной и углеродистых сталей для исследования приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Ø НЛЗ, мм	Содержание основных элементов, % масс.				
		C	Mn	Si	P	S
09Г2С	335 × 400	0,09	1,43	0,55	0,023	0,022
Требования ГОСТ 19281 – 89		≤ 0,12	1,40 – 1,80	0,17 – 0,37	≤ 0,035	≤ 0,040
ER7	450	0,48	0,73	0,29	0,008	0,005
Требования EN 13262 (D)		≤ 0,52	≤ 0,80	≤ 0,40	≤ 0,020	≤ 0,015
2	450	0,57	0,73	0,29	0,011	0,005
Требования ГОСТ 10791 – 2011		0,55–0,63	0,50–0,90	0,22–0,45	≤ 0,030	≤ 0,025

Образцы для металлографического анализа вырезали в поверхностных слоях, на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса ($\frac{1}{4}$ толщины) и в центральных слоях – в основных зонах макроструктуры непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) круглого и прямоугольного сечения, трубных заготовок и из всех элементов колёс – ободьев, дисков и ступиц. Схема вырезки образцов показана на рис. 1.

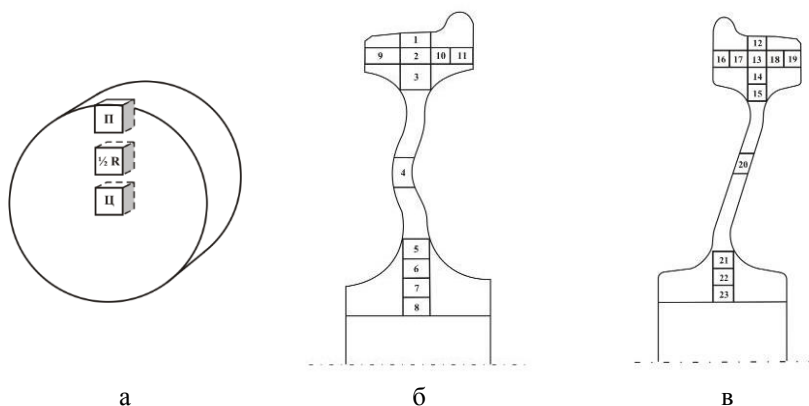


Рисунок 1 – Схема вырезки и маркировка образцов непрерывнолитых и трубных заготовок (а) и железнодорожных колёс Ø 927 мм с С-образным диском (б) и Ø 957 мм плоскоконическим диском (в)

Металлографические исследования выполнены на микроскопе «Axiovert 200 M MAT» и «Neophot 32» производства фирмы «Carl Zeiss», количественный анализ выполнен в программе «AxioVision 4.6.3» в полуавтоматическом режиме.

«Следы» дендритной структуры выявляли травлением в горячем растворе пикрата натрия [13]. Этот реактив выявляет химическую микронеоднородность кремния (дендритную ликвацию, твердофазную сегрегацию), приводя к потемнению участков с его повышенным содержанием. Чтобы сократить продолжительность травления в горячем растворе пикрата натрия, элементы колеса Ø 957 мм (обод, диск и ступицу) отжигали 1 час в лабораторной печи СНОЛ – 15/1300 при температуре 850 °С. Для обеспечения более высокой точности результатов измерений определение металлографических характеристик (параметров «бывшей» дендритной структуры) в образцах производили на шлифах, приготовленных в радиальной плоскости [14].

Основная часть. Ранее установлено, что химическая неоднородность кремния и марганца, образовавшаяся при кристаллизации в результате дендритной ликвации этих элементов, представляет собой так называемые «следы» дендритной структуры в микроструктуре проката. Она является естественной структурной составляющей углеродистых и низколегированных сталей и остаётся постоянной на протяжении всего цикла производства металлопроката [15]. Поскольку форма, ориентация, размеры «бывших» дендритных ветвей и междендритных пространств, их объёмные доли при затвердевании и деформировании изменяются по сечению заготовок и готового изделия, плотность дендритной структуры

является наиболее информативным показателем, который одновременно учитывает изменения перечисленных параметров и определяется как количество линейных элементов в объёме металла [16].

Рассмотрим, как происходит трансформация «следов» дендритной структуры по сечению непрерывнолитой заготовки 335×400 мм и трубных заготовок двух диаметров 250 и 180 мм из стали 09Г2С (рис. 2). Характер изменения дендритной структуры НЛЗ полностью соответствует известным представлениям о формировании структуры стального слитка, отлитого в изложницу [17]. В поверхностных слоях, где при затвердевании образуются самые мелкие кристаллы, сегрегационные участки и участки без видимой сегрегации имеют наименьшие размеры (табл. 2).

Существенной разницы между дендритной структурой в образцах верхней, нижней и боковой поверхностей не наблюдается. Различие её размеров не превышает 5 мкм и говорит об одинаковых термокинетических условиях затвердевания по периметру исследуемой заготовки. В направлении от поверхности к центральным слоям размеры дендритных ветвей и междендритных пространств увеличиваются, т.е. как и по сечению слитка, разлитого в изложницу, чётко прослеживается переход от зоны столбчатых кристаллов к центральной зоне равноосных кристаллов.

Изменение параметров дендритной структуры по сечению заготовок отражает характер деформирования. С уменьшением диаметра трубной заготовки дендритные ветви и междендритные пространства вытягиваются в направлении прокатки, располагаются ближе друг к другу и становятся тоньше (табл. 2). Для более удобного анализа распределения деформации по толщине заготовок дендритную структуру рассматривали как единый структурный элемент без разделения на составляющие: дендритные ветви и междендритные пространства. Изменение абсолютного (Δd) и относительного (ϵ) изменения средних размеров дендритной структуры позволило судить о местных степенях деформации в определённых слоях металла. Определено, что при прокатке НЛЗ 335×400 мм на трубные заготовки (ТЗ) $\varnothing 250$ мм и $\varnothing 180$ мм дендритная структура изменяется в среднем по сечению на 40 % и 55 % соответственно. Однако в центральных слоях трубных заготовок она не прорабатывается, а просто вытягивается в направлении прокатки.

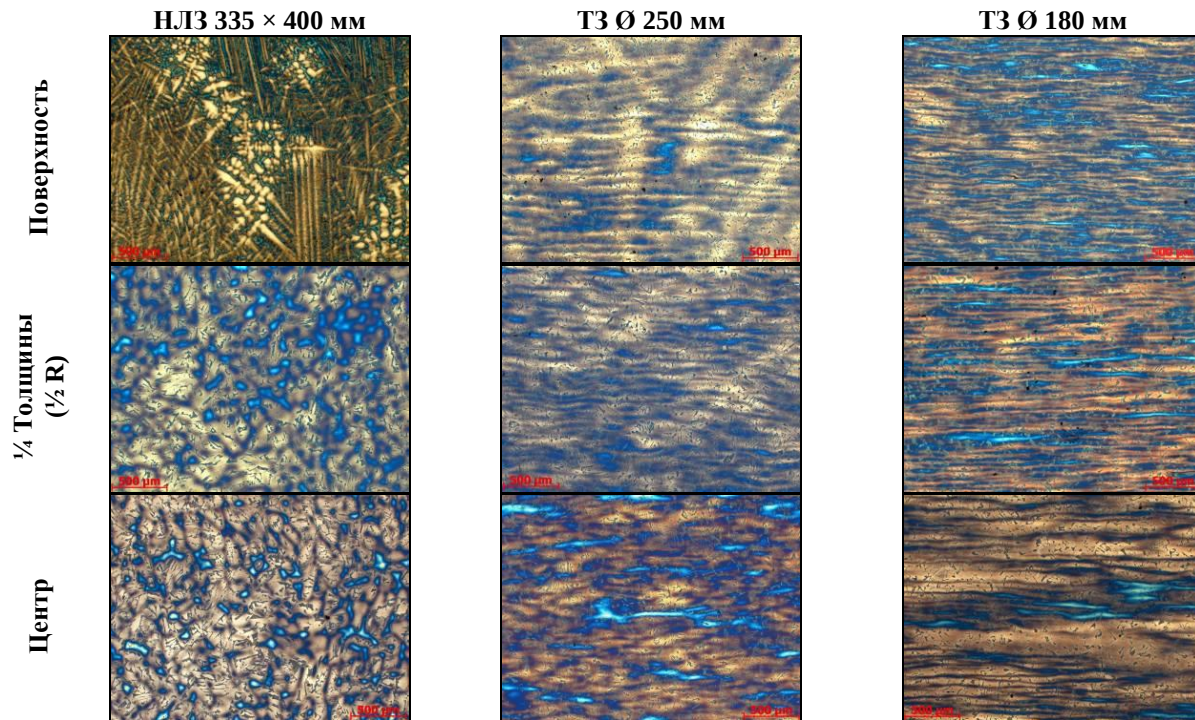


Рисунок 2 – Изменение дендритной структуры по сечению (верхняя половина вертикальной грани) непрерывнолитой и трубных заготовок, × 50

Таблица 2. Результаты металлографического анализа образцов непрерывнолитой и трубных заготовок

Заготовка, мм	Место	Объемная доля участков, %		Средний размер «следов» дендритной структуры D, мкм	Изменение среднего размера дендритной структуры	
		сегрегационных	без сегрегаций		Δ , мкм	ϵ , %
335 × 400	П	18,90	81,10	128,93	—	—
	½ R	26,60	73,40	214,87	—	—
	Ц	29,75	70,25	301,17	—	—
Ø 250	П	29,20	70,80	77,90	51,03	39,6
	½ R	29,70	70,30	121,77	93,10	43,3
	Ц	34,30	65,70	180,7	120,47	40,0
Ø 180	П	31,00	69,00	48,00	80,94	62,8
	½ R	32,50	67,50	94,28	140,59	56,12
	Ц	34,60	65,40	155,6	145,57	48,33

Примечание: П – поверхностные слои, ½ R – на расстоянии ½ радиуса (¼ толщины) и Ц – центральные слои заготовки.

Линейными элементами в непрерывнолитой и в трубных заготовках являются элементы «бывшей» дендритной структуры: дендритные ветви (участки без видимой сегрегации) и междендритные пространства (сегрегационные участки). «Следы» дендритной структуры и в литом, и в деформированном металле не имеют полной линейной ориентации в пространстве, поэтому их плотность определяется по формуле [10]:

$$\sum L = 2 \cdot M \quad (1),$$

где $\sum L$ – плотность линейных элементов в единице объема металла, $1/\text{мм}^2$;

M – среднее число следов этих элементов на единице площади секущей плоскости.

При деформации НЛЗ 335 × 400 мм на ТЗ Ø 250 мм и Ø 180 мм кратность вытяжки составляет 2,73 и 5,26. Расчёты, выполненные по изменению плотности дендритной структуры, показали что, в среднем, по сечению трубных заготовок она повышается в 2,84 и 5,35 раза соответственно (табл. 3). Относительная погрешность предложенного метода не превышает 5 %. С учётом особенностей затвердевания НЛЗ и действующего режима обжарки на трубнозаготовочном стане показано, что наиболее проработанными оказываются поверхностные слои, в которых плотность элементов дендритной структуры ($\sum L$) максимальна.

Таблица 3. Результаты расчета вытяжки проката по изменению плотности «следов» дендритной структуры

Заготов- ка, мм	Место	Плотность дендритной структуры в объёме сплава, ΣL 1/мм ²	Уплотнение дендритной структуры	Среднее по сечению уплотнение дендритной структуры	Вытяжка факти- ческая	Относит. Погреш- ность, %
335 × 400	П	153	–	–	–	–
	½ R	55	–			
	Ц	29	–			
Ø 250	П	418	2,73	2,84	2,73	4,15
	½ R	171	3,10			
	Ц	78	2,70			
Ø 180	П	1105	7,22	5,35	5,26	1,71
	½ R	286	5,20			
	Ц	105	3,62			

По мере приближения к центральным слоям величина ΣL уменьшается, что свидетельствует об ухудшении прорабатываемости.

Использование плотности «следов» дендритной структуры в качестве показателя прорабатываемости дало возможность сравнить различные режимы обжарки слитка осевой стали на блюминге с учётом проникновения деформации к центральной зоне заготовки и выбрать наиболее рациональный режим [18].

На рисунках 3 и 4 показано как изменяются «следы» дендритной структуры по сечению исходных заготовок (в поверхностных слоях, на расстоянии ½ радиуса и в центральных слоях) и, соответственно, в ободьях, дисках и ступицах исследуемых колёс после горячей пластической деформации.

В структуре обеих литых заготовок плотность «следов» дендритной структуры имеет максимальные значения в поверхностных слоях. Это влияние интенсивности охлаждения на повышение количества центров образования зародышей кристаллов (дендритов). По мере продвижения от поверхности к центральным слоям величина плотности дендритной структуры резко понижается и достигает минимальных значений в центральных слоях. Изменение плотности дендритной структуры по сечению непрерывнолитых заготовок Ø 450 мм из стали марки ER 7

и

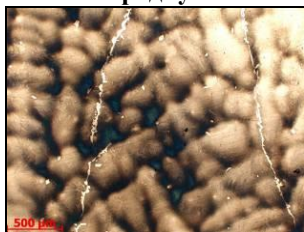
**НЛЗ Ø 450 мм
Поверхность**



**Колесо Ø 927 мм
Обод, образец № 1**



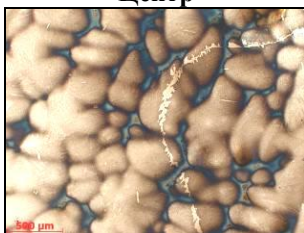
$\frac{1}{2}$ радиуса



Диск, образец № 14



Центр



Ступица, образец № 8



Рисунок 3 – «Следы» бывшей дендритной структуры в микроструктуре образцов стали марки ER 7, $\times 50$

марки 2 описывается полиномиальной зависимостью во 2-ой степени. Это позволило определить величину плотности дендритной структуры на расстоянии $\frac{1}{4}$ и $\frac{3}{4}$ радиуса исходных заготовок графическим методом (рис. 5).

Результаты количественной металлографии и расчёта степени деформации дендритной структуры по изменению её плотности в элементах колеса представлены в таблице 4.

На рисунках 3 и 4 (*образцы, вырезанные в поверхностных слоях НЛЗ и из ободьев колёс*) показано как под действием растягивающих и сжимающих напряжений изменилась форма и размеры дендритной структуры. Это привело к уменьшению количества дендритов, приходящихся на единицу секущей плоскости. С учётом данных особенностей течения металла в ободьях колёс относительное изменение плотности дендритной структуры рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Sigma_0 - \Sigma_{\dot{\varepsilon}}}{\Sigma_0} \cdot 100\%$$

(2),

где Σ_0 – плотность дендритной структуры в исходной заготовке, 1/мм²;

Σ_{κ} – плотность дендритной структуры в колесе после деформации, 1/мм².

**НЛЗ Ø 450 мм
Поверхность**



**Колесо Ø 957 мм
Обод, образец № 12**



½ радиуса



Диск, образец № 20



Центр



Ступица, образец № 23



Рисунок 4 – «Следы» бывшей дендритной структуры в микроструктуре образцов стали марки 2, × 50

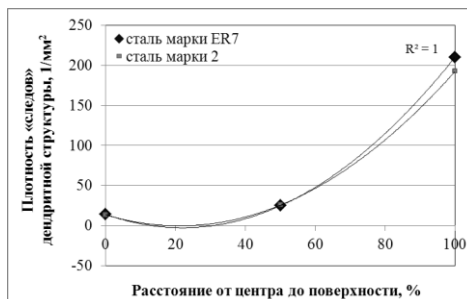


Рисунок 5 – Изменение плотности «следов» дендритной структуры по сечению непрерывнолитых заготовок Ø 450 мм из стали марки ER 7 и марки 2

Максимальное значение относительного изменения плотности «следов» дендритной структуры наблюдается в образцах № 1 и 12, вырезанных вблизи поверхности катания (табл. 4). В следующих за ними образцах № 2 и 13 изменение данного параметра уменьшается. Как было отмечено выше, это связано с особенностями формирования дендритной структуры по сечению НЛЗ. В образце № 3 и 14, 15, вырезанных в месте перехода обода в диск колеса, величина накопленной деформации и относительное изменение плотности «следов» дендритной структуры имеют всё большее расхождение. В образцах № 9 – 11 и 16 – 19, вырезанных в вертикальной плоскости ободьев исследуемых колёс, значения определяемого параметра хорошо согласуются с величиной относительной деформации, полученной расчётным путём.

Для диска характерно сжатие в осевом направлении и удлинение в радиальном и тангенциальном. Такой характер течения металла полностью отображает изменение формы «следов» дендритной структуры (см. рис. 3 и 4 образцы, вырезанные на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса НЛЗ и из дисков колёс). При этом относительное изменение плотности её «следов» рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Sigma_{\Sigma} - \Sigma_0}{\Sigma_0} \cdot 100\%$$

(3).

Для колеса Ø 927 мм с С-образным диском шириной ~ 40 мм относительное изменение дендритной структуры составило 52,4 %, для колеса Ø 957 мм с плоскоконическим диском шириной ~ 20 мм – $\varepsilon_{\Sigma L} = 70,39\%$.

Таблица 4. Результаты расчёта степени деформации дендритной структуры по изменению плотности её «следов» в элементах колёс

Заготовк а / колесо	Место	№	Средний размер «следов» дендрито в D, мкм	Плотнос ть «следов» дендрито в в объёме стали, ΣL , 1/мм ²	Относи- тельное измени е плотност и «следов» дендрито в, $\varepsilon_{\Sigma L}$, %	Накопленн ая деформаци я в элементах колёс ε , %*
НЛЗ Ø 450 мм	П	–	110,00	210,45	–	–
	$\frac{3}{4}$ R	–	270,00	117,66	–	–
	$\frac{1}{2}$ R	–	320,00	24,87	–	–
	$\frac{1}{4}$ R	–	372,00	19,50	–	–
	Ц	–	425,00	14,10	–	–
Колесо Ø 927 мм	Обод	1	131,30	15,23	92,76	86,12 – 88,95
		2	148,02	13,51	88,51	88,95 – 91,20
		3	83,12	24,06	66,27	91,20 – 92,99
		9	143,11	13,97	88,12	88,95 – 91,20
		10	143,51	13,94	88,15	
		11	149,88	13,34	88,66	88,95 – 86,19
	Диск	4	38,28	52,24	52,40	96,46 – 97,18
	Ступиц а	5	67,06	29,82	34,62	95,56
		6	102,36	19,54	27,84	95,56 – 96,46
		7	107,1	18,67	24,49	
		8	78,34	25,53	44,77	
НЛЗ Ø 450 мм	П	–	115,00	192,55	–	–
	$\frac{3}{4}$ R	–	215,00	109,10	–	–
	$\frac{1}{2}$ R	–	315,00	25,66	–	–
	$\frac{1}{4}$ R	–	375,00	19,56	–	–
	Ц	–	435,00	13,46	–	–
	Обод	12	131,28	15,23	92,08	83,31 – 86,19
		13	187,72	10,65	90,23	
		14	72,63	27,53	74,76	

		1 5	56,84	35,19	67,75	88,57 – 90,54
		1 6	190,39	10,50	90,37	86,19 – 88,57
		1 7	182,12	11,00	89,93	83,31 – 86,19
		1 8	187,63	10,65	90,22	83,31 – 86,19
		1 9	187,90	10,64	90,24	83,31 – 86,19
	Диск	2 0	23,08	86,66	70,39	90,54 – 93,52
	Ступиц а	2 1	71,00	28,17	34,94	90,54 – 92,17
		2 2	108,07	18,51	27,27	92,17 – 93,52
		2 3	80,75	24,77	45,65	93,52 – 94,64

Примечание: степень накопленной деформации в элементах колёс определена с помощью программы «Forge 3» [19, 20].

С увеличением усилия при осаживании на формовочном прессе получается более тонкий диск и, естественно, каждый элемент дендритной структуры испытывает максимальное растяжение в радиальном направлении. Большая толщина диска определяет меньшее удлинение его центральных слоёв. Этим и объясняется различие в размере и плотности дендритной структуры С-образного и плоскоконического диска колёс Ø 927 и 957 мм при практически одинаковых данных параметрах в исходных заготовках (табл. 4).

Металл ступицы, как и обода, испытывает осевое удлинение при радиальном и тангенциальном сжатии (см. рис. 3 и 4 образцы, вырезанные из центральных слоёв НЛЗ и из ступиц колёс). При такой схеме деформаций «следы» бывших дендритов одновременно растягиваются в одном направлении, а в двух других сжимаются.

Образцы ступиц исследуемых колёс в исходной заготовке соответствовали центральным слоям и слоям, расположенным на расстоянии $\frac{1}{4}$ радиуса от центра (табл. 4). Относительное изменение плотности её «следов» рассчитывали по формуле (2). Поскольку исходная дендритная структура являлась достаточно крупной, после деформации она уплотнилась незначительно. Этим и объясняется достаточное расхождение в результатах определения

относительного изменения плотности дендритной структуры и величины накопленной деформации.

Однако относительное изменение плотности «следов» дендритной структуры в срединных слоях ступиц исследуемых колёс имеет общую тенденцию с распределением накопленной деформации, определённой с помощью компьютерного моделирования [19, 20]. В образцах № 8 и 23, вырезанных вблизи поверхности ступиц, на которую напрессовывается железнодорожная ось, относительное изменение плотности дендритной структуры достигает $\sim 45\%$. Далее следует зона, где металл не испытывает особой деформации сжатия, а лишь истекает, заполняя центральную полость штампа. Относительное изменение плотности дендритной структуры в этой зоне уменьшается до $\sim 25\%$. В зоне, расположенной на границе перехода ступицы в диск, «следы» дендритов вытягиваются в радиальном направлении, а под действием сжимающих напряжений они уплотняются до $\sim 35\%$.

Данные результаты подтверждают вывод, сделанный в работе [21], что в диске колёсной заготовки существует нейтральный слой, в обе стороны от которого происходит истечение металла к ободу и в ступицу. Происходит это вследствие того, что осажённая заготовка, диаметр которой несколько меньше внутреннего диаметра формовочного кольца, легко вначале уширяется к периферии, в то время как при истечении в ступицу металл встречает значительное сопротивление со стороны как оправки, так и стенок штампов, наклонённых к вертикали. При этом слой, от которого происходит истечение металла в обод, расположен непосредственно у ступицы. После соприкосновения заготовки с боковой поверхностью формовочного кольца начинается истечение металла в периферийную полость. Сопротивление истечению к периферии сильно возрастает, и слой, разделяющий области истечения в обод и ступицу, смещается в сторону обода.

Подводя итог, необходимо отметить, что относительное изменение плотности «следов» дендритной структуры в исследованных цельнокатаных колёсах с С-образным и плоскоконическим дисками изменяется следующим образом: в образцах ободьев (до места его перехода в диск) данный параметр достигает максимальных значений, и его величина хорошо согласуется с величиной накопленной деформации, полученной расчётным путем. В образцах дисков и ступиц относительное изменение плотности дендритной структуры снижается. Вероятно,

в месте перехода обода в диск колеса металл не испытывает особой деформации сжатия, а лишь истекает, заполняя периферийную полость штампа. Аналогичное изменение относительной плотности «следов» дендритной структуры наблюдается и образцах ступиц, что подтверждает сделанный ранее вывод о наличии в колёсных заготовках нейтрального слоя.

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

Разработан метод определения степени накопленной деформации в металле трубных и колёсных заготовок. Показано, что использование относительного изменения плотности «следов» дендритной структуры в качестве показателя прорабатываемости позволяет определить особенности течения металла и глубину его проработки по сечению металлопродукции.

Установлено, что при простых схемах деформации погрешность определения степени деформации и коэффициента вытяжки по изменению плотности «следов» дендритной структуры не превышает 5 %.

Предложенный показатель прорабатываемости металла может быть использован в промышленных условиях для оптимизации режимов производства различных видов проката со сложными схемами деформирования.

1. *Danchenko V. N.* Investigation of Tool Effect on Deformation Unhomogeneity under Free Upsetting of Rail Wheel Banks / V. N. Danchenko, V. L. Chukhleb, A. V. Ashkelyanets a. o. // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – Vol. 3. – No. 3. – P. 41 – 43.
2. *Чекмарёв А. П.* Интенсификация режима обжатий на блюминге 1150 / А. П. Чекмарёв, В. Л. Павлов, В. М. Клименко и др. // Сталь. – 1955. – № 10. – С. 916 – 921.
3. *Шифрин М. Ю.* Влияние деформации заготовки на прессах и в колёсопрокатном стане на механические свойства диска и обода цельнокатаных колёс / М. Ю. Шифрин, Ю. В. Андреев, В. А. Лихошвай // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 8. – С. 7 – 11.
4. *Шишов А. А.* Влияние параметров деформации на механические свойства колёс, упрочненных с прокатного нагрева А. А. Шишков, С. А. Королёв, В. А. Тарасова // Сталь. – 2007. – № 9. – С. 87 – 91.
5. *Узлов И. Г.* Влияние горячей пластической деформации на механические свойства колёсной стали / И. Г. Узлов,

- А. И. Бабаченко, Ж. А. Дементьева // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 2. – С. 56 – 58.
6. Узлов И. Г. Влияние размера колёсной заготовки и режимов её пластической деформации на служебные свойства колёс / И. Г. Узлов, А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. – 2006. – Вып. 13. – С. 137 – 142.
7. Бабаченко А. И. Влияние горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства сталей для железнодорожных колёс / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, А. Ю. Борисенко и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. – 2012. – Вып. 25. – С. 177 – 186.
8. Чекмарёв А. П., Павлов В. Л., Мелешко В. И. и др. Теория прокатки крупных слитков. – М.: Металлургия, 1968. – 252 с.
9. Голубев Т. М. Особенность деформации слитка на блюминге / Т. М. Голубев // *Труды ВНИТОМ*. Том 2. – М.: Металлургиздат, 1954. – С. 57 – 73.
10. Александров П. А. Противоречия в современном направлении конструирования блюмингов и пути их разрешения / П. А. Александров – М.: Металлургиздат, 1954 – 231 с.
11. Клименко В. М. К вопросу об определении деформируемости металла и распределения напряжений при прокатке крупных слитков / В. М. Клименко // *Сб. науч. трудов. Прокатное производство*. Том. 11. – Изд-во АН УССР, 1957. – С. 86 – 97.
12. Лебедев В. Н. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании / В. Н. Лебедев, В. П. Троицкий, Ю. М. Антощенко и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 1977. – № 3. – С. 109 – 111.
13. Коваленко В. С. Металлографические реактивы / *Справ. под. ред. В. С. Коваленко* – М.: Металлургия, 1981. – 102 с.
14. Рутес В. С. Метод определения скорости кристаллизации непрерывнолитой заготовки по дендритной структуре / В. С. Рутес, Е. И. Акимова, Е. В. Филимонова // *Бюллетень ЦНИИТЭИЧМ*. – 1969. – № 16. – С. 51 – 53.
15. Левченко Г. В. Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, Е. Г. Демина и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 2. – С. 74 – 76.
16. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.

17. *Ефимов В. А.* Стальной слиток. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 356 с.
18. *Левченко Г. В.* Влияние режимов деформации слитка на трансформацию дендритной структуры в заготовках для производства железнодорожных осей / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, Е. Г. Дёмина и др. // Информационные технологии в обработке давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск, 2008. – С. 27.
19. *Бабаченко А. И.* Влияния параметров исходных заготовок для производства железнодорожных колёс на процесс горячей пластической деформации / А. И. Бабаченко, Е. Г. Дёмина, А. В. Кныш и др. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2016. – № 6. – С. 35 – 40.
20. *Дёмина Е. Г.* Определение степени накопленной деформации в элементах железнодорожного колеса Ø 927 мм в процессе пластической деформации / Е. Г. Дёмина // Сучасні проблеми металургії. – 2017. – № 20. – С. 31 – 42.
21. *Бибик Г. А.* Производство железнодорожных колёс / Г. А. Бибик, А. М. Иоффе, А. В. Праздников и др. – М.: Metallurgiya, 1982. – 232 с.

К. Г. Дьоміна

Метод визначення ступеня накопиченої деформації в трубних і колісних заготовках за зміною щільності «слідів» дендритної структури.

Розроблено метод визначення ступеня накопиченої деформації в трубних і колісних заготовках за зміною щільності «слідів» дендритної структури. Запропонований показник пропрацювання металу може бути використаний в промислових умовах для оптимізації режимів виробництва різних видів прокату зі складними схемами деформування.

Ключові слова: дендритная структура, безперервноліті заготовки, трубні заготовки, залізничні колеса, ступінь накопиченої деформації.

K. H. Domina

Method of determining the degree of accumulated deformation in pipe and wheel billets by changing the density of "traces" of the dendritic structure.

The method of estimation of the accumulated deformation degree of round and wheel billets by the change in density of dendritic structure «traces» has been developed. The proposed factor of metal workability can be used in industrial conditions to optimize production modes for various types of rolled products with complicated schemes of deformation.

Key words: dendritic structure, continuous cast billets, round billets, railway wheels, accumulated deformation degree.

УДК 621.762

А.В. Мовчан к.т.н., Е.А. Черноиваненко к.т.н.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ЖИДКОФАЗНОМ
СПЕКАНИИ ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ С
ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОТОВОГО ИНСТРУМЕНТА***Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр*

Исследованы закономерности фазовых и структурных превращений при диффузионном изменении состава в спрессованной порошковой смеси сплавов, в которых концентрация легирующих элементов аналогична стандартной быстрорежущей стали, но отличающиеся содержанием углерода. Методом геометрической термодинамики установлены диффузионные потоки при выравнивании концентрации углерода в порошковой смеси.

Ключевые слова: многофазные превращения, быстрорежущая сталь, жидкофазное спекание, геометрическая термодинамика, структурообразование, диффузия, эвтектика, задача Стефана.

Введение. Традиционная технология производства быстрорежущего инструмента, основанная на литье и горячей деформации слитков имеет ряд известных недостатков, к которым можно отнести карбидную неоднородность и низкий коэффициент использования материала [1, 2]. Проблема получения дисперсной однородной структуры решается на базе современной порошковой металлургии, преимущества которой широко известны [3, 4]. Высокая скорость охлаждения при распылении расплава быстрорежущей стали предотвращает появление локальных участков ледебуритной эвтектики, таким образом, карбидная неоднородность в порошковых быстрорежущих сталях отсутствует. Дисперсность карбидов выше в 15...20 раз (1...2 мкм вместо 8...10 мкм) по сравнению со сталью, изготовленной по традиционной технологии. Стойкость такого инструмента выше в 1,5...3,5 раз (в зависимости от состава стали и размеров инструмента) [5].

Целью работы было установить закономерности фазовых и структурных превращений при диффузионном выравнивании концентрации углерода в спрессованной порошковой смеси при нагреве и выдержке выше температуры плавления эвтектики.

Материал и методики исследований. Химический состав сплавов приведен в таблице 1. Сплавы механически измельчали, затем спрессовывали до плотности 95-98% в объемном соотношении, при котором средняя концентрация углерода по смеси составляла 1,10...1,12 масс. %. Произшедшие в прессовках

превращения, исследовали с использованием методов оптической микроскопии и геометрической термодинамики.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов

	C, %	W, %	Mo, %	Cr, %	V, %	Si, %	Mn, %	S, P, %
Сплав I	0,09	6,18	5,26	4,33	1,90	0,17	0,26	≤0,02
Сплав II	3,82	6,45	5,12	4,16	1,84	0,19	0,20	≤0,02

Результаты исследований и их обсуждение. Структура сплава I в исходном состоянии представляет собой крупнозернистый феррит с небольшим количеством карбидных включений глобулярной формы. Структура высокоуглеродистого сплава II представляет собой ледебуритную эвтектику. На рис. 1 изображен участок диаграммы Fe-W-C при температуре 1150 °С, построенный по данным [6]. Если представить концентрации основных легирующих элементов в сплаве вольфрамовым эквивалентом, то равновесия в изучаемой системе можно анализировать в приближении тройной системы и использовать методы геометрической термодинамики, в том числе и правило рычага. Пунктирной линией на рис. 1 обозначен химический состав диффузионной пары сплав I – сплав II в диапазоне минимальной и максимальной концентрации углерода. Линия проходит через несколько многофазных областей, поэтому диффузионное изменение концентрации углерода должна сопровождаться рядом фазовых и структурных превращений. После нагрева до температуры 1150 °С эвтектическая составляющая смеси превращается в жидкость (L) состава II, и процесс диффузионного выравнивания концентрации углерода активизируется. Общепринятым условием при анализе кинетики фазовых превращений является термодинамическое равновесие (равенство химических потенциалов компонентов) на межфазных границах. При температуре спекания сплав I имеет ферритно-карбидную структуру. Соблюдением условия равновесия является образование аустенитной (аустенитно-карбидной) прослойки между феррито-карбидной и жидкой высокоуглеродистой составляющими смеси. При увеличении в феррито-карбидной составляющей концентрации углерода за счет его притока из высокоуглеродистой составляющей через прослойку, в феррите выделяются дисперсные карбиды M_6C , а исходные карбиды увеличиваются в размерах. При достижении концентрации углерода точки 1 на стороне ab конодного треугольника $\alpha + \gamma + M_6C$, в равновесии находятся α -феррит состава а,

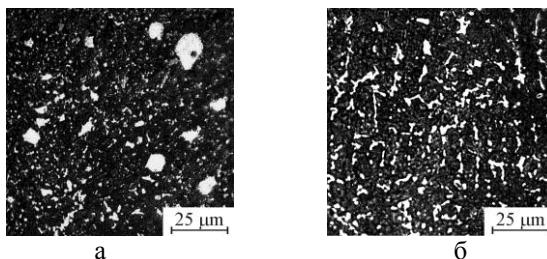


Рисунок 2 – Микроструктура исследуемой смеси порошков в процессе спекания: а – начальная стадия, б – после спекания в течение 30 мин

Задача не имеет аналитического решения без существенных упрощений. Однако, без проведения численных расчетов можно утверждать следующее. Принимая во внимание $D_\alpha \gg D_\gamma$ и конвективное перемешивание расплава, кристаллизация в начальный момент взаимодействия невозможна из-за интенсивной доставки углерода к межфазной границе. Напротив, вполне вероятно некоторое продвижение аустенитно-карбидной прослойки в сторону низкоуглеродистой составляющей и увеличение количества жидкой фазы. Кристаллизация начинается только когда состав расплава приблизится к точке 5 и уменьшится градиент $\left. \frac{\partial C_L}{\partial r} \right|_{r=r_1}$. По данным [9] обезуглероживание расплава такого состава приводит к кристаллизации аустенита, которая сопровождается оттеснением легирующих элементов в расплав. Расплав постепенно обогащается легирующими элементами и достигает состава f на диаграмме (рис. 1).

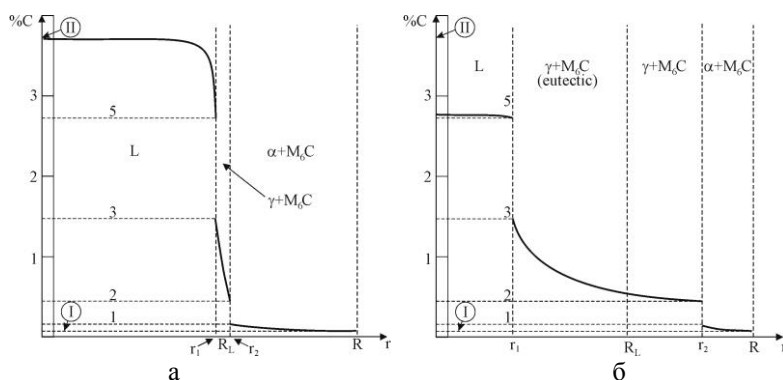


Рисунок 3 – Распределение углерода в диффузионной паре в сферических координатах для симметричного случая с началом координат в центре расплавленной частицы: R_L – радиус расплавленной частицы; R – половина расстояния до соседней частицы; r_1 – положение границы раздела $L / \gamma + M_6C$; r_2 – положение границы раздела $\gamma + M_6C / \alpha + M_6C$; цифры на графике соответствуют рис. 1; а – начальный момент взаимодействия; б – установившаяся стадия

Дальнейшее обезуглероживание приводит к одновременной кристаллизации γ и M_6C фаз по механизму, подобному эвтектическому. Экстраполяция линий, разделяющих однофазную L и двухфазные $L+\gamma$ и $L+M_6C$ области, на величину обеднения углеродом позволяет определить поперечный градиент концентраций основных легирующих элементов в расплаве. В процессе кристаллизации эти элементы полностью перераспределяются между γ и M_6C фазами. Морфология эвтектики сходна эвтектике в стандартной быстрорежущей стали в литом состоянии [9]. Однако, при металлографическом исследовании спеченных образцов в месте контакта двух составляющих смеси участков чистого аустенита обнаружено не было. По всей вероятности, из-за небольшой разности концентраций в точках 5 и f, коротких диффузионных путей и, как следствие, большого градиента концентрации углерода, кристаллизация проходила с большой скоростью, и кристаллизация аустенита подавлялась. Распределение углерода в спекаемой паре при установившемся процессе представлено на рис. 3б. Более длительная выдержка не приводит к каким-либо существенным структурным изменениям, а только сопровождается выравниванием концентрации углерода в аустенитной матрице материала (рис. 2б).

Выводы

Представленные в работе результаты позволили осветить ряд вопросов структурообразования и фазовых превращений при жидкофазном спекании смеси порошков низкоуглеродистой быстрорежущей стали и высокоуглеродистого сплава, легированного по принципу быстрорежущей стали, которые до настоящего времени изучены не были. Полученные данные позволят более гибко управлять конечной структурой конкретных изделий, а, следовательно, удачно решать практические задачи улучшения технологических и эксплуатационных характеристик порошкового режущего инструмента.

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. 4-ое изд. М.: Металлургия, 1975. 84 с.
2. Ревис И.А., Лебедев Т.А. Структура и свойства литого режущего инструмента. Л.: Машиностроение, 1972. 128 с.
3. Абрамов А.А., Самойленко Л.С., Гиршов В.Л. Порошковые инструментальные стали с дисперсной структурой. Металлообработка. 2008. №4. С. 31-35.
4. Ernst I. C., Duh D. ESP4 and TSP4, a comparison of spray formed with powdermetallurgically produced cobalt free high-speed steel of type 6W-5Mo-4V-4Cr. Journal of materials science– 2004. – №39. – P. 6831-6834.
5. Позняк Л.А. Перспективы применения порошковых быстрорежущих сталей. Порошковые быстрорежущие стали (структура, свойства, технология производства инструмента). К.: «Наукова думка», 1990. С. 5-12.
6. Per Gustafson. A Thermodynamic Evaluation of the C-Fe-W System. Met. Trans. 1987. Vol. 18A. No 2. P. 175-188.
7. Бунин К.П., Мовчан В.И., Педан Л.Г. Структурообразование при изотермическом науглероживании железных сплавов легированных молибденом и вольфрамом. Изв. АН СССР. Металлы. 1975. №3. С. 164-168.
8. Мовчан В.И., Педан Л.Г., Герасименко В.П. Рост карбидных волокон при диффузионном науглероживании железных сплавов. МитОМ. 1983. №9. С. 19-21.
9. Мовчан О.В., Бачурін А.П., Черноіваненко К.О. Закономірності фазових і структурних перетворень при кристалізації розплаву Fe-W-C в процесі знеуглецювання. Металознавство і обробка металів. 2014. № 2. С. 46-50.

А. В. Мовчан, Е. А. Черноіваненко

Дослідження перетворень при рідкофазному спіканні порошкової швидкоріжучої сталі з метою підвищення якості готового інструменту.

Досліджено закономірності фазових і структурних перетворень при дифузійній зміні складу в спресованій порошковій суміші сплавів, в яких концентрація легуючих елементів аналогічна стандартній швидкоріжучій сталі, але відрізняються вмістом вуглецю. Методом геометричної термодинаміки встановлені дифузійні потоки при вирівнюванні концентрації вуглецю в порошковій суміші.

Ключові слова: багатофазні перетворення, швидкоріжуча сталь, рідкофазне спікання, геометрична термодинаміка, структуроутворення, дифузія, евтектика, задача Стефана.

A. V. Movchan, E. A. Chernov

Investigation of transformations in liquid-phase sintering of powder high-speed steel in order to improve the quality of the finished instrument.

The regularities of phase and structural transformations are studied in composition diffusion change within the compacted powder mixture of alloys, in which the alloying elements concentration corresponds to a standard high-speed steel, but carbon content is different. The method of geometrical thermodynamics is applied to determine the diffusion streams at leveling off the carbon concentration in the powder mixture.

Keywords: phase transformation, high speed steel, liquid-phase sintering, geometric thermodynamics, structure, diffusion, eutectic, Stefan problem

ЗМІСТ

Алхасова В.В. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 6 НА ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГУБТ.....	3
Семыкин С. И., Чернятевич А. Г., Голуб Т. С., Дудченко С. А., Вакульчук В. В. ИССЛЕДОВАНИЕ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОВОЛЬТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ШЛАКО-МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ВАННУ.....	8
Кондратенко А. И., Камуз А. М. ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ SWIP С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТОК.....	13
Zhadanos A.V., Derevyanko I.V., Chaika D.O. DEVELOPMENT THE AUTOMATED INFORMATIONAL SYSTEM OF LADLE-FURNACE FOR PREDICTION THE CONTENT OF ALLOYING ELEMENTS IN STRUCTURAL STEEL.....	19
Чепракова Я. А., Шляхова Ю. А., Алхасова В. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН КОРРОЗИИ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 9 МЕТКОМБИНАТА «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ»	25
Губенко С. І., Нікульченко І. О. ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВПЛИВУ НА КОГЕЗИВНУ МІЦНІСТЬ МІЖФАЗНИХ МЕЖ ВКЛЮЧЕННЯ-МАТРИЦЯ СТАЛІ.....	31
Шляхова Ю. А., Чепракова Я. А. СОКРАЩЕНИЕ СБРОСА ЗАГРЯЗНЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В РЕКУ ДНЕПР ИЗ ШЛАМОНАКОПИТЕЛЯ ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ».....	38
Дёмина Е. Г. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТРУБНЫХ И КОЛЁСНЫХ ЗАГОТОВКАХ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЛОТНОСТИ «СЛЕДОВ» ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ.....	44
Мовчан А. В., Черноиваненко Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ЖИДКОФАЗНОМ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОТОВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	62