

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 2 (37) 2021

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, по специальностям: 05.16.02 Металлургия черных, цветных и редких металлов; 05.16.04 Литейное производство; 05.16.05 Обработка металлов давлением, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Редакционный совет

Председатель ред. совета:

В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Члены ред. совета:

С.В. Денисов – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

А.Н. Емелюшин – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

И.Е. Илларионов – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

А.А. Казаков – д-р техн. наук, проф.
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

В.М. Колокольцев – президент
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук, проф.

З. Конопка – д-р техн. наук, проф.
Ченстоховского технологического
университета, Польша

О. Островский – д-р техн. наук, проф.
UNSW, Австралия

А.М. Песин – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

М. Дабала – д-р техн. наук, проф.
Университет Падуи, Италия

Р.П. Кардосо – д-р техн. наук, проф.
Федеральный университет Санта-Катарины,
Бразилия

П. Тандон – д-р техн. наук, профессор
и руководитель машиностроения, Индийский ин-
ститут информационных технологий, дизайна и
производства PDPM, Джабалпур, Индия

В.Б. Деев – д-р техн. наук, проф.
НИТУ МИСиС, Москва, Россия

А.А. Попов – д-р техн. наук, проф.
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

В.М. Салганик – д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

О.Ю. Шешуков – д-р техн. наук, проф.
ГУ ИМетРАН, ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Главный редактор:

А.С. Савинов – директор института
металлургии, машиностроения
и материалообработки
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук

Научный редактор:

Н.Ш. Тютряков – канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Технический редактор:

Ю.А. Извеков – проф., канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»;
К.И. Рудь

Дизайнер:

Е.О. Харченко

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д.38).
16+, в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ от 29.12.10.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-74213 от 02.11.2018 г. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 315
Тел.: (3519) 29-84-64.
E-mail: TТаPEoMP@ magtu.ru; ttmp@ magtu.ru

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
участок оперативной полиграфии

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Выход в свет 30.06.2021. Заказ 162. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 2 (37) 2021

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the journals can be found into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI)

Editorial Board Members

Chairman:

V.A. Bigeev – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Honorary Board Members:

S.V. Denisov – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

A.N. Emelyushin – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

V.M. Kolokoltsev – D. Sc., Professor,
President of Nosov Magnitogorsk State Technical
University

Z. Konopka – D.Sc., Professor,
Czestochowa University of Technology, Poland

O. Ostrovski – D.Sc., Professor,
University of New South Wales, Australia

A.M. Pesin – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

A.A. Popov – D.Sc., Professor,
Institution of Higher Professional Education «Ural
Federal University named after the first President of
Russia B.N.Yeltsin»

M. Dabala – D.Sc., Professor, University of Padova,
Italy

R.P. Cardoso – D. Sc., Professor,
Federal University of Santa Catarina, Brazil

V.B. Deev – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow,
Russia

P. Tandon – D. Sc., Professor & Head of Mechanical
Engineering, PDPM Indian Institute of Information
Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India

I.Y. Illarionov – D.Sc., Professor,
Chuvash State University

V.M. Salganik – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

A.A. Kazakov - D.Sc., Associate Professor,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

O. Ju. Sheshukov – D.Sc., Professor,
alloys Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Professional Education
«Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N.Yeltsin»

Editor-in-Chief:

A.S. Savinov – Director of Metallurgy Mechanical
Engineering and Materials Processing Institute D.Sc., No-
sov Magnitogorsk State Technical University

Scientific Editor:

N.S. Tyteriakov – Ph.D., Nosov Magnitogorsk State
Technical University

Technical Editor:

Y.A. Izvekov – Professor, Ph.D., Nosov Magnitogorsk
State Technical University

K.I. Rud

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2021

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Registration certificate PI # FS 77-74213 dated November 02, 2018 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

Editorship address:

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.
E-mail: TTAPEoMP@ magtu.ru; tmp@ magtu.ru

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Editorial office:

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date 30.06.2021. Order 162. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Искаков И.Ф. АО «Уральская Сталь» – СЕГОДНЯ И ЗАВТРА.....	4
Кузнецов М.С., Гареев Р.Р., Михеев А.Е. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ РАБОЧЕГО СЛОЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ».....	7
Искаков И.Ф., Куницын Г.А., Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Сибатуллина М.И., Макарова И.В. ОСОБЕННОСТИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»	11
Искаков И.Ф., Валиахметов А.Х., Кузнецов М.С., Прокуровский Д.А., Шепелев Д.А. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В 120-ТОННЫХ ГИБКИХ МОДУЛЬНЫХ ПЕЧАХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»	19
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	24
Бедринов А.И., Куницын Г.А., Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Самохина О.В. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ШТРИПСА, СТОЙКОГО К СЕРОВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ.....	24
Бедринов А.И., Куницын Г.А., Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Рой В.М. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ШТРИПСА ПОВЫШЕННОЙ ХЛАДОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ОБУСТРОЙСТВА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗАВОДА ПО ПРОИЗВОДСТВУ СЖИЖЕННОГО ГАЗА ОАО «ЯМАЛ-СПГ»	32
Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Кожемякина А.Е. ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА	38

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Iskakov I.F. JSC Ural Steel – TODAY AND TOMORROW	4
Kuznetsov M.S., Gareev R.R., Mikheev A.E. WAYS TO INCREASE THE DURABILITY OF THE LINING OF THE WORKING LAYER OF METALLURGICAL UNITS OF ELECTRIC STEELMAKING PRODUCTION OF JSC «URAL STEEL»	7
Iskakov I.F., Kunitsyn G.A., Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Sibagatullina M.I., Makarova I.V. PECULIARITIES OF UNSECURED HEAT STATE OF BLAST FURNACES OF JSC "URAL STEEL"	11
Iskakov I.F., Valiakhmetov A.Kh., Kuznetsov M.S., Proskurovsky D.A., Shepelev D.S. FEATURES OF STEEL MAKING TECHNOLOGY IN 120-TON FLEXIBLE MODULAR FURNACES JSC "URAL STEEL"	19
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	24
Bedrinov A.I., Kunitsyn G.A., Pridein A.A., Prokopenko L.V., Bazaev E.L., Samohina O.V. SPECIAL ASPECTS OF PRODUCTION OF STRIPS RESISTANT TO HYDROGEN SULFIDE STRESS CRACKING	24
Bedrinov A.I., Kunitsyn G.A., Pridein A.A., Prokopenko L.V., Bazaev E.L., Roi V.M. SPECIAL ASPECTS OF PRODUCTION OF STRIPS WITH LOW TEMPERATURE PROPERTIES FOR THE ARRANGEMENT OF GAS DISTRIBUTION SYSTEMS FOR THE LIQUEFIED GAS PRODUCTION PLANT JSC YAMAL-LNG	32
Biryukova O.D., Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Kozhemiakina A.E. THE POSSIBILITY OF OBTAINING A GRADIENT STRUCTURE OF THE ALUMINUM LAMINATED COMPOSITE DURING ASYMMETRIC DEFORMATION	38

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.1

Искаков И.Ф.

АО «Уральская Сталь» – СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

Аннотация. АО «Уральская Сталь» является крупнейшим металлургическим комбинатом Оренбуржья и одним из ведущих российских производителей чугуна, стали и металлопроката и нацелено на повышение эффективности и безопасности производства, на сокращение техногенного воздействия на окружающую среду, на улучшение качества и конкурентоспособности своей продукции. Предприятие является одним из основных производителей в Российской Федерации товарного чугуна, листа для производства газо- и нефтепроводных труб, судо- и мостостроения, для котлов, работающих под давлением, круглых заготовок для производства железнодорожных колес и квадратных заготовок для производства рельсов для скоростных железных дорог. На предприятии продолжается масштабная комплексная программа развития. На добровольной основе несет дополнительные обязательства по поддержке программ развития города. Ежегодно в реализацию значимых проектов в Новотроицке в рамках соглашения о социально-экономическом партнерстве с администрациями города и региона вкладывает порядка 300 млн рублей. При содействии комбината Новотроицк первым в регионе получил статус территории опережающего социально-экономического развития, привлекает инвесторов и развивает новые бизнесы для создания устойчивой экономики города.

Ключевые слова: металлопрокат, сталь, чугун, эффективность, экология, социальная ответственность, развитие.



АО «Уральская Сталь» – крупнейший металлургический комбинат Оренбуржья, является одним из ведущих российских производителей чугуна, стали и металлопроката.

История становления предприятия началась в довоенный период, но именно 5 марта 1955 года, когда была запущена первая доменная печь и выдан первый чугун на Орско-Халиловском металлургическом комбинате (ОХМК ныне Уральская Сталь), считается днём рождения металлургического гиганта восточного Оренбуржья.

Предприятие имеет пять основных переделов: коксохимическое, агломерационное, доменное, сталеплавильное и прокатное производство.

Коксохимическое производство – начало цикла комбината. Здесь из угольной шихты производят кокс – основной вид топлива для выпуска чугуна. В про-

цессе улавливания из коксового газа выделяют каменноугольную смолу, сульфат аммония и бензол.

Агломерационное производство ежегодно выпускает порядка 3 млн тонн агломерата, который наряду с коксом является необходимым сырьем для производства чугуна.

В доменном цехе выплавляют чугун с низким содержанием серы и примесей. В жидком виде он поступает на разливочные машины и далее в виде чушек отгружается на экспорт или идет дальше по производственной цепочке в электросталеплавильный цех.

Электросталеплавильный цех является одной из самых технологичных площадок комбината. Производит порядка ста марок стали повышенного качества для судо- и мостостроения, для котлов, работающих под давлением, для газонефтепроводных труб. В рамках долгосрочных контрактов здесь отливают круглую заготовку диаметром 455 мм для производства железнодорожных колес на АО «ВМЗ» и прямоугольного сечения – для изготовления рельсов на ТОО «АРБЗ». Слябы по технологии горячего посада поступают в листопрокатный цех.

В листопрокатном цехе на высокотехнологичном оборудовании из поступивших из ЭСПЦ слябов делают металлопрокат, соответствующий самым высоким потребительским свойствам.

Отдельно стоит упомянуть фасонно-литейный цех, где освоили производство крупногабаритного литья для нужд сталеплавильного и доменного производства комбината, а также для сторонних горно-металлургических предприятий.

Продукция АО «Уральская Сталь» много раз удостоивалась международного признания. В копилке достижений награды за новые марки стали, за инвестиционные программы, за новые технологии и высокое качество.

Широкий ассортимент высококачественной металлопродукции, надежность и комплексный характер поставок позволяют новотроицким металлургам активно участвовать в реализации крупнейших инфраструктурных проектов в России и экспортировать в страны ближнего и дальнего зарубежья.

АО «Уральская Сталь» номер один на рынке мостовых сталей в России. Более 100 мостов возведено из продукции «Уральской Стали», из последних:

- Большой Москворецкий мост.
- Мост через реку Пур на Ямале.
- Высокогорный мост на Енисее.

Также является крупным поставщиком конструкционной стали для строительства. Новотроицкий прокат использовался при строительстве:

- объектов для Олимпиады в Сочи;
- стадионов для Чемпионата мира по футболу;
- многофункционального комплекса «Москва-Сити»;
- конструкций Храма Христа Спасителя в Москве.

Являясь поставщиком высококачественной судовой стали, комбинат поставляет прокат ведущим российским и зарубежным судостроительным предприятиям.

Поставляет высококачественные марки стали для производства труб. Из стали комбината построены нефте- и газопроводы стратегического значения:

- Бованенково – Ухта.
- Балтийская трубопроводная система.
- Трубопроводная система Каспийского трубопроводного консорциума.
- Южный поток.

«Уральская Сталь» нацелена на повышение эффективности и безопасности производства, на сокращение техногенного воздействия на окружающую среду, на улучшение качества и конкурентоспособности своей продукции. На предприятии продолжается масштабная комплексная программа развития.

В электросталеплавильном цехе благодаря реконструкции машины непрерывного литья №1 освоен выпуск новых видов продукции – литых колесных и рельсовых заготовок для Выксунского металлургического и Актюбинского рельсобалочного завода. Проведена модернизация установки вакуумирования стали, что увеличило ее производительность в 1,5 раза до 1,8 млн тонн в год. Мероприятие позволило нарастить выпуск востребованной потребителями высококачественной стальной продукции. Электродуговые печи переведены на новую энергоэффективную и экологичную технологию, что позволяет свести к нулю потребление на печах электроэнергии и обеспечить гибкость при использовании различных компонентов шихты с возможно-

стью увеличения доли жидкого чугуна в шихте до 95% (не более двух часов требуется на переход с классической технологии выплавки в ДСП на технологию без использования электроэнергии).

В первом листопрокатном цехе запущен высокотехнологичный термический комплекс. Установка нового оборудования роликовой термической печи и закалочного прессы позволила увеличить производительность печи и повысить качественные характеристики термообработанного толстолистового проката.

В доменном цехе модернизирована доменная печь ДП-2, завершается модернизация доменной печи №3. Для работы с максимальной производительностью ДП-2 и ДП-3 оснастили системой охлаждения и футеровкой с применением медных высокотеплопроводных холодильных плит в комбинации с графитовыми огнеупорами.

Модернизация собственной генерации с применением современных технологий – важная часть комплексной программы развития АО «Уральской Стали». Замена котлов теплоэлектроцентрали на агрегаты с высоким КПД необходима для поддержания энергетических мощностей предприятия – обеспечение паром воздуходувок доменного цеха, теплотермической подразделений комбината и города.

На базе кислородно-компрессорного цеха возводится воздухоразделительная установка №6 производительностью 20 тысяч кубометров в час технического кислорода. Проект реализуется совместно с компанией Linde и обеспечит цеха комбината кислородом, азотом и аргоном.

Достижением является внедрение программы Industry 4.0 и перевода бизнес-процессов на новый цифровой уровень. Данная интегрированная система управления, внедряемая на предприятиях Металлоинвеста, направлена на сокращение затрат, повышение прибыльности, прозрачности бизнес-процессов и своевременности принятия решений. Комплексная трансформация бизнес-процессов позволяет Компании выйти на новый уровень развития и обрести устойчивость к внешним воздействиям.

Претворение в жизнь стратегической программы развития комбината невозможно без умелых и знающих работников. Люди – главный актив предприятия. Сохранение ценных квалифицированных специалистов и привлечение лучших, создание условий для раскрытия и развития их потенциала – основа кадровой политики на комбинате.

АО «Уральская Сталь» – это команда профессионалов, где безопасность – приоритетное направление трудовой деятельности, а желание совершенствоваться и улучшать производственный процесс поддерживается на уровне руководства.

Минимизация влияния на экосистему – важнейший приоритет производственной деятельности новотроицких металлургов. Ежегодно миллиарды рублей направляют на природоохранные мероприятия. И каждый год «Уральская Сталь» успешно подтверждает

ет соответствие производственной деятельности требованиям системы международного стандарта.

Основными достижениями природоохранной деятельности являются: наличие шлакоперерабатывающей технологии и бессточной системы водоснабжения, открытие уникального полигона для размещения промышленных отходов и снижение годового показателя выбросов за последние 10 лет на 30%. Качество воздуха на контрольных точках комбината находится под постоянным контролем собственной лаборатории мониторинга окружающей среды, а воздействие предприятия на окружающую среду стабильно ниже ПДВ.

АО «Уральская Сталь» является одним из лидеров региона в области корпоративной социальной ответственности. Среди приоритетных направлений – достойная оплата труда сотрудников. Поддержка семьи и родительства является одним из ключевых направлений социального пакета.

Ветераны предприятия – объект особого внимания. После выхода на пенсию они продолжают активную жизнь: участвуют в корпоративных программах и создают секции по интересам. Ежемесячно они получают дотацию к пенсии, а к значимым праздникам –

подарки. Совет ветеранов «Уральской Стали» – самый многочисленный в регионе, включает более 10 тысяч пенсионеров, из которых более тысячи имеют трудовые правительственные награды или звания.

«Уральская Сталь» – гарант благополучия Новотроицка. Будучи одним из крупнейших налогоплательщиков региона, комбинат более миллиарда рублей в год направляет в консолидированный бюджет Оренбургской области.

На добровольной основе несет дополнительные обязательства по поддержке программ развития города. Ежегодно в реализацию значимых проектов в Новотроицке в рамках соглашения о социально-экономическом партнерстве с администрациями города и региона вкладывает порядка 300 млн рублей.

При содействии комбината Новотроицк первым в регионе получил статус территории опережающего социально-экономического развития, привлекает инвесторов и развивает новые бизнесы для создания устойчивой экономики города.

Уже 66 лет АО «Уральская Сталь» делает мир прочнее!

Сведения об авторах

Искаков Ильдар Фаритович – управляющий директор АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: info@uralsteel.com

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

JSC Ural Steel – TODAY AND TOMORROW

Iskakov Ildar F. – Managing Director of JSC Ural Steel, Novotroitsk, Russia. E-mail: info@uralsteel.com.

Abstract. JSC Ural Steel is the largest iron and steel plant of the Orenburg region and one of the leading Russian producers of iron, steel and rolled steel products. Ural Steel is aimed at increasing efficiency and safety of production, decreasing man-made impact on the environment, improvement of quality and competitive performance of its products. The company carries on implementing a large scale comprehensive development program.

Key words: rolled steel products, steel, iron, efficiency, environment, social responsibility, development.

Ссылка на статью:

Искаков И.Ф. АО «Уральская Сталь» – сегодня и завтра // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 4-6.
Iskakov I.F. JSC Ural Steel – today and tomorrow. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 4-6.

УДК 669.1

Кузнецов М.С., Гареев Р.Р., Михеев А.Е.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ РАБОЧЕГО СЛОЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Аннотация. Огнеупоры играют важнейшую роль в металлургическом производстве. От продолжительности между ремонтных периодов зависит эффективность работы основных агрегатов. Постоянно усложняющийся сортамент выплавляемых сталей ухудшает условия службы футеровки дуговых сталеплавильных печей, сталеразливочных и промежуточных ковшей. В статье рассмотрены проблемы снижения уровня стойкости футеровки рабочего слоя сталеплавильных печей, сталеразливочных и промежуточных ковшей ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» в период внедрения и освоения новых технологий выплавки, обработки и разлива стали и пути их решения. Выплавка стали в ЭСПЦ производится в двух гибких модульных печах проектной вместимостью по 140 т каждая. Внепечная обработка стали производится на двух двухпозиционных агрегатах комплексной обработки стали типа «ковш-печь» (УКП) и двухпозиционном камерном выкувателе (УВС). В цехе эксплуатируются две МНЛЗ: одноручьевая слябовая и четырехручьевая комбинированная (блумовая). Технологии применения современных видов огнеупорных материалов и изделий в сталеплавильном производстве осваиваются параллельно совершенствованию технологии выплавки и внепечной обработки стали, следствием чего является постоянно возрастающие требования сталеплавильщиков к качественным и эксплуатационным свойствам огнеупоров.

Ключевые слова: футеровка, стойкость, гибкая модульная печь, технология, магнезиальный флюс, стальковш, вакуумирование, торкретирование, промковш, разлива, серийность.

Введение

Одним из основных направлений технического развития в сталеплавильном производстве металлургического предприятия является повышение эффективности применения огнеупорных изделий и материалов. Актуальность реализации мероприятий в данном направлении обусловлена необходимостью снижения удельных затрат на огнеупоры и увеличения производительности сталеплавильных агрегатов в условиях постоянного повышения требований к качеству выплавляемой стали. В свою очередь, для повышения качества стали совершенствуются действующие и осваиваются новые технологические методы и режимы выплавки, внепечной обработки и разлива стали, что приводит к ужесточению условий эксплуатации огнеупорных материалов и изделий.

В связи с этим на АО «Уральская Сталь» был реализован ряд мероприятий по внедрению в сталеплавильном производстве современных технологий применения и эксплуатации огнеупорных материалов и изделий. В данной статье рассмотрены основные мероприятия по использованию огнеупоров в электросталеплавильном цехе в последнее время и результаты их реализации.

Футеровка гибких модульных печей электросталеплавильного цеха

Электросталеплавильный цех АО «Уральская Сталь» характеризуется высоким уровнем технологического оснащения. Выплавка стали в ЭСПЦ производится в двух гибких модульных печах проектной вместимостью по 140 тонн каждая. Внепечная обработка стали производится на двух двухпозиционных агрегатах комплексной обработки стали

типа «ковш-печь» (УКП) и двухпозиционном камерном выкувателе (УВС). В цехе эксплуатируются две МНЛЗ: одноручьевая слябовая и четырехручьевая комбинированная (блумовая).

Гибкая модульная печь характеризуется эркерным выпуском металла и возможностью работы в режимах FMF (до 100% жидкого чугуна) и EAF (классической печи переменного тока). Использование новых технологий выплавки стали в условиях гибкой модульной печи подразумевало использование новых высокостойких огнеупорных изделий и материалов в совокупности с увеличением толщин футеровки рабочего слоя печи по элементам.

С марта 2019 года началось освоение новой технологии выплавки стали в модернизированных печах. Однако интенсификация процессов выплавки и доводки металла в новой печи на этапе освоения новых технологий не позволила в полной мере достичь поставленных задач по необходимому уровню стойкости. При этом также отмечались отклонения от гарантийных показателей по технологическим параметрам выплавки. При заданных параметрах производства наблюдалось нарушение процесса шлакообразования, что в свою очередь приводило к отклонениям параметров работы печи от планируемых и невозможности своевременного обслуживания футеровки печи.

В данных условиях специалистами предприятия были проведены работы по повышению стойкости отдельных элементов и футеровки печей в целом. В результате проведенных работ к марту 2020 года удалось подобрать оптимальный режим шлакообразования и состав металлошихты. За счет внедренных корректировок технологии производства стали, выполнения футеровки рабочего слоя, а также актуализации регламента по обслуживанию футеровки и проведению ее ремонтов удалось увеличить стойкость футеровки печи с 600–650 до 760–800 плавок. При этом

усредненный удельный расход огнеупорных материалов ГМП составил:

- изделий (на выполнение рабочего слоя футеровки стен и шлакового пояса и на промежуточный ремонт) – 1,3 кг/т стали;
- набивных масс (на выполнение рабочего слоя футеровки и обслуживание подины) – 1,7 кг/т стали;
- торкрет-массы (на межплавочное обслуживание футеровки стен) – 1,2 кг/т стали;
- ремонтной массы (на межплавочные ремонты откосов) – 2,1 кг/т стали.

В настоящее время специалистами АО «Уральская Сталь» проводятся дальнейшие исследования, направленные на увеличение стойкости футеровки и снижение удельных показателей по расходу огнеупоров ГМП. Одним из приоритетных курсов в данном направлении является применение магнезиальных флюсов в течение плавки ГМП с целью повышения содержания MgO в печном шлаке и снижения его активности по отношению к футеровке рабочего слоя ГМП.

Футеровка сталеразливочных ковшей электросталеплавильного цеха

В футеровке рабочего слоя стен сталковшей АО «Уральская Сталь» вместимостью 120 т используются периклазоуглеродистые огнеупорные изделия форматов 7/8, 7/30 (толщина кладки 177,8 мм), шлакового пояса – форматов 9/16 и 9/30 (толщина кладки 228,6 мм). Футеровку рабочего слоя днища выполняют из огнеупорного бетона, приготовленного на основе тиксотропных масс.

С вводом в эксплуатацию в электросталеплавильном цехе АО «Уральская сталь» установки вакуумирования стали камерного типа отмечено резкое падение стойкости футеровки рабочего слоя сталеразливочных ковшей. Анализ стойкости футеровки сталеразливочных ковшей, обрабатываемых на УВС, по сравнению со стойкостью футеровки без обработки на УВС в процессе эксплуатации показал снижение средней стойкости футеровки рабочего слоя в среднем на 21%. Известно, что процесс вакуумирования стали приводит к:

- обезуглероживанию рабочей поверхности периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочных ковшей, что в свою очередь повышает пористость огнеупорных изделий и способствует увеличению глубины их пропитки шлаком;
- образованию диффузии оксидов CaO в объем огнеупора с последующим взаимодействием с его углеродистой составляющей, что при воздействии высокой температуры и глубокого вакуума ускоряет процессы износа периклазоуглеродистых изделий;
- появлению процессов восстановления компонентов, входящих в состав огнеупорной футеровки, и взаимодействия ее с продуктами раскисления.

Иными словами, в условиях вакуума протекает процесс обезуглероживания рабочей поверхности пе-

риклазоуглеродистой футеровки, что в сочетании с повышением температуры способствует проникновению компонентов шлака в связующую часть огнеупоров по порам и существенно интенсифицирует износ футеровки. Это в совокупности со скрытыми дефектами косоугольности торцевых граней используемых огнеупорных изделий рабочего слоя приводит к образованию так называемых «прососов» в кладке, представляющих собой сквозные размывы до буферного и арматурного слоя футеровки ковша, на участках сопряжения боковых граней огнеупорных изделий с указанным дефектом.

Кроме того, следует отметить, что период эксплуатации сталеразливочных ковшей в настоящее время характеризуется также жесточенными, по сравнению с предыдущими, условиями эксплуатации футеровки, что связано с непрерывным процессом оптимизации технологии и повышения качества продукции.

Таким образом, существующий уровень стойкости футеровки рабочего слоя сталеразливочных ковшей ЭСПЦ обусловлен жесткими условиями эксплуатации, а именно получением предельных негативных значений отдельных показателей как на отдельных плавках, так и в целом за кампанию футеровки сталеразливочных ковша в условиях и в совокупности с увеличенной долей вакуумирования стали.

В связи с этим в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» был реализован ряд мероприятий по внедрению технологий, направленных на повышение стойкости рабочего слоя сталеразливочных ковшей:

1. Внедрена технология шлакообразования с использованием магнезиального флюса при обработке стали в сталеразливочных ковшах. В сталеразливочные ковши при выпуске плавки из печей совместно с известью вводится магнезиальный флюс с расходом от 100 до 150 кг (в среднем 120 кг). При использовании магнезиального флюса шлак во время внепечной обработки обладает достаточной жидкоподвижностью и десульфуризирующей способностью. В процессе его присадки на выпуске плавки из печи дополнительного газо- и пылевыведения, а также выплесков и разбрызгивания шлака не отмечено. В процессе эксплуатации сталеразливочных ковшей с использованием флюса после разлива плавки по визуальной оценке на футеровке шлакового пояса и стен сталеразливочных ковшей отмечено наличие гарнисажа (шлакового покрытия).

2. Внедрена технология «горячего» ремонта футеровки рабочего слоя шлакового пояса и стен сталеразливочных ковшей методом торкретирования: при выявлении в процессе эксплуатации сталковша изношенных участков футеровки стен, шлакового пояса в виде трещин, сколов, прососов проводят их «горячий» ремонт – торкретирование. Причем торкретирование носит локальный характер, т.е. торкретируются только отдельные участки футеровки с указанными локальными дефектами. Торкретирование выполняет-

ся в межплавочный период на горизонтальном стенде сразу после подготовки шибберного затвора при температуре торкретируемой поверхности от 600 до 1000°C (по визуальной оценке). При этом установлено, что оптимальным периодом начала торкретирования футеровки сталеразливочных ковшей является период образования трещин и (или) сколов на поверхности рабочего слоя футеровки как стен, так и шлакового пояса.

Стойкость торкрет-слоя в швах и трещинах футеровки составляет от 1 до 3 плавков, что в совокупности с образованием гарнисажа при ежеплавочном использовании магнезиального флюса и соответствующем межплавочном обслуживании позволяет добиться увеличения стойкости отдельных участков футеровки с указанными локальными дефектами и, соответственно, футеровки стальной ковша в целом до 10 плавков.

Таким образом, внедренные технологии шлакообразования с использованием магнезиального флюса и торкретирования футеровки рабочего слоя стен и шлакового пояса сталеразливочных ковшей ЭСПЦ позволили повысить стойкость отдельных участков футеровки рабочего слоя и, как следствие, футеровки стальной ковша в целом, до 80 плавков (с перефутеровкой шлакового пояса после 40 плавков).

Кроме того, в настоящее время, с целью снижения удельных затрат на применяемые в производственном процессе сырье и материалы, в условиях АО «Уральская Сталь», взамен технологии шлакообразования с использованием привозного магнезиального флюса, опробована и успешно внедрена технология использования периклазоуглеродистой смеси, изготовленной из боя бывших в эксплуатации печных и ковшевых огнеупорных изделий рабочего слоя.

Футеровка промежуточных ковшей электросталеплавильного цеха

В промежуточных ковшах ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» вместимостью 25 т жидкой стали футеровка выполняется следующим образом:

- футеровка арматурного слоя – монолитная, выполнена из огнеупорного бетона с помощью шаблона;
- футеровка рабочего слоя выполняется магнезиальной торкрет-массой, с дифференцированной толщиной, в зависимости от необходимого уровня серийности разливки;
- изделия сталеразливочного тракта корундографитового состава: защитная труба, стопор-моноблок, погружной стакан.

Сведения об авторах

Кузнецов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, начальник управления технического сопровождения сталеплавильного производства, АО «Уральская Сталь», г. Новотроицк, Россия. E-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com.

Гареев Руслан Разифович – кандидат технических наук, главный специалист по сопровождению огнеупорных материалов технической дирекции, АО «Уральская Сталь», г. Новотроицк, Россия. E-mail: r.gareev@uralsteel.com.

Кроме того, в промковше используются изделия для формирования потоков металла – металлоприемник и перегородки, как корундового, так и магнезиального состава.

При этом до 2019 года серийность разливки на МНЛЗ1-1 (блужная) и МНЛЗ-2 (слябовая) была ограничена сортаментом заказов до 8 плавков на один промежуточный ковш.

Специалистами предприятия были проведены работы, направленные на освоение производства и разливки новых марок стали и расширение сортамента, что позволило увеличить возможность повышения серийности разливки до 20 плавков. После проработки специалистами АО «Уральская Сталь» были проведены совместные с поставщиками испытания новых видов огнеупорных материалов и изделий сталеразливочного тракта, которые в настоящее время обеспечивают возможность разливки стали с серийностью 20 плавков и более на один промежуточный ковш.

Заключение

Технологии применения современных видов огнеупорных материалов и изделий в сталеплавильном производстве осваиваются параллельно совершенствованию технологии выплавки и внепечной обработки стали, следствием чего является постоянно возрастающие требования сталеплавильщиков к качественным и эксплуатационным свойствам огнеупоров. Достигнутые результаты в определенных условиях в последующем утрачивают свою актуальность, что приводит к дальнейшему развитию новых и совершенствованию действующих технологий. В связи с этим технологи АО «Уральская Сталь», наряду с необходимостью снижения удельных затрат на огнеупоры и увеличения производительности сталеплавильных агрегатов в условиях постоянного повышения требований к качеству выплавляемой стали, особое внимание уделяют вопросам научно-технического развития в области производства и эксплуатации огнеупорной продукции. При этом положительный результат реализации тех или иных мероприятий во многом зависит от качества его проработки технологическим персоналом металлургического предприятия. Представленные выше результаты реализации мероприятий по повышению стойкости футеровок металлургических агрегатов ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» полностью соответствуют данному процессу, что позволяет в последующем не останавливаться на достигнутом.

Михеев А. Е. – главный специалист – начальник огнеупорного отдела управления технического сопровождения сталеплавильного производства, АО «Уральская Сталь», г. Новотроицк, Россия. E-mail: a.miheev@uralsteel.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

WAYS TO INCREASE THE DURABILITY OF THE LINING OF THE WORKING LAYER OF METALLURGICAL UNITS OF ELECTRIC STEELMAKING PRODUCTION OF JSC «URAL STEEL»

Kuznetsov Maxim S. – Head of the Department of Technical Support of Steelmaking Production of JSC "Ural Steel", Candidate of Technical Sciences, Novotroitsk, Russia. E-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com.

Gareev Ruslan R. – Chief Specialist in the maintenance of refractory materials of the Technical Directorate, Ph. D., of JSC "Ural Steel", Novotroitsk, Russia. E-mail: r.gareev@uralsteel.com.

Mikheev A. E. – Chief Specialist-Head of the Refractory Department of the Department of Technical Support of Steelmaking Production of JSC "Ural Steel", Novotroitsk, Russia. E-mail: a.miheev@uralsteel.com.

Annotation. *The article deals with the problems of reducing the level of resistance of the lining of the working layer of steelmaking furnaces, steel casting and intermediate buckets of the Ural Steel SPC JSC, during the introduction and development of new technologies for smelting, processing and casting steel and ways to solve them.*

Keywords: *lining, durability, flexible modular furnace, technology, magnesia flux, steel casting, vacuuming, shotcrete, industrial casting, casting, seriality.*

Ссылка на статью:

Кузнецов М.С., Гареев Р.Р., Михеев А.Е. Пути повышения стойкости футеровки рабочего слоя металлургических агрегатов электросталеплавильного производства АО «Уральская Сталь» // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 7-10.
Kuznetsov M.S., Gareev R.R., Mikheev A.E. Ways to increase the durability of the lining of the working layer of metallurgical units of electric steelmaking production of JSC «Ural Steel». *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 7-10.

УДК 669.162.2

Искаков И.Ф., Куницын Г.А., Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Сибатуллина М.И., Макарова И.В.

ОСОБЕННОСТИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

***Аннотация.** Для условий работы доменных печей АО «Уральская сталь» исследовали особенности теплового состояния при неустойчивом ходе процессов. Непосредственными причинами были колебания качества шихты, регулирование температуры и состава дутья, а также распределения материалов и газов по сечению печи, на что накладывалось влияние изменений движения материалов в воронках схода и ниже уровня фурм. При изменении качества и распределения шихты средняя продолжительность переходного периода была равна времени, в течении которого шихта в зоне потока менялась 2–3 раза. При изменении параметров дутья время переходного состояния было меньше на время смены шихты в зоне потока. Изменения силового взаимодействия потоков шихты и газа и хода процессов восстановления отражались на тепловом состоянии горна со сдвигом во времени, равном в среднем времени пребывания материалов в зоне с практически полным использованием тепла. Эта зона составляет $\frac{2}{3}$ – $\frac{3}{4}$ зоны потока материалов. Прогноз быстрых отклонений теплового состояния исключает влияние систематических ошибок в контроле состава проплавляемых материалов.*

***Ключевые слова:** доменная печь, чугун, шлак, тепловое состояние, неустойчивый ход процессов, переходный период.*

Неотъемлемой частью работы доменных печей является регулирование технологии производства чугуна посредством изменения параметров загрузки [1–7] и дутья [8–13]. В частности, для различных материалов разрабатывают рациональные режимы их загрузки, обеспечивающие приближение к равномерному распределению их по окружности и рациональному по радиусу [1, 2, 5, 7]. Устанавливают рациональный химический состав жидких продуктов плавки для обеспечения соответствия требованиям сталеплавильного производства, стабильного их дренажа через слой коксовой насадки [3, 4, 14], формирования гарнисажа в горне печи [15–20]. Обеспечивают повышение содержания кислорода в дутье до оптимальных величин [21–23], рост температуры дутья [24] и подогрев природного газа [25]. Перераспределяют природный газ и дутье по группам доменных печей для повышения экономичности плавки [26]. Корректировка режимов работы печей сопровождается появлением переходных процессов [24–30]. Неустойчивый их ход, отражаясь на силовом взаимодействии потоков шихты и газа, проявляется через неровный сход шихты и изменение теплового состояния [31]. Непосредственными причинами могут быть: колебания качества шихты, несвоевременное и количественно неверное регулирование температуры и состава дутья, а также распределения материалов и газов по сечению печи, на что накладывалось влияние изменения движения материалов в воронках схода и ниже уровня фурм.

Для эффективного управления ходом доменной плавки целесообразно исследовать неустойчивые процессы в печи, вызванные изменением режимов загрузки или дутьевых параметров. В связи с этим исследовали особенности неустойчивого теплового состояния доменных печей АО «Уральская сталь».

В свойствах шихты наиболее существенное значение имели колебания содержания мелочи в агломерате. Изменения содержания железа в железорудном сырье АО «Уральская Сталь» вызывают меньшие колебания силового взаимодействия потоков и теплового состояния, так как экономия кокса (до 1–1,7 % на 1% Fe) при повышении богатства мало отличается от роста выхода чугуна (1,6–2,0 % на 1% Fe). Текущие отклонения богатства подготовленного железорудного сырья сопровождаются более значительными колебаниями расхода кокса (до 4–5 %), так как более богатое сырье обрабатывается газовым потоком с большим количеством и меньшей степенью использования газов-восстановителей. Уменьшали и устраняли такое влияние изменения богатства на сход шихты и тепловое состояние упреждающим регулированием его, руководствуясь фактическим влиянием богатства на расход кокса в данных условиях. Для этого с повышением или понижением содержания железа (изменением богатства) рудную или коксовую колошу изменяли в соответствии со средним влиянием богатства, установленным на основе обработки полученных ранее производственных данных. Таким образом, решение вопросов текущего регулирования целесообразно сочетать со статистической обработкой технологических данных, в частности с установлением влияния богатства шихты на ход и результаты доменного процесса.

По результатам анализа работы доменных печей АО «Уральская Сталь» колебания силового взаимодействия потоков шихты и газа, содержания кремния в чугуне и влажности дутья, являющихся характеристиками теплового состояния, получались существенно большими, чем можно было бы ожидать от непосредственного влияния изменений в свойствах шихты. Но в то же время величина этих колебаний меньше тех значений, которые следуют из изменения соотношения интенсивностей движения шихты и газа. Максимальным отклонением содержания мелочи в шихте, равным 1,5–2%, соответствует изменение со-

держания кремния в чугунах на 0,1–0,16%. Однако по анализам максимальная амплитуда колебаний содержания кремния в чугунах получается больше и составляет 0,3–0,5%. Это превышение вызывается тем, что влияние колебания состава шихты на нагрев печи усиливается временными отклонениями соотношения интенсивностей движения потоков материалов и газов. Максимальным значением амплитуды колебаний этого соотношения 15–20% при установившемся ходе процессов соответствует разница в содержании кремния, равная 1–1,6%. Фактическое колебание содержания кремния значительно меньше в связи с инерционностью процесса. Таким образом, отклонения соотношения интенсивностей движения потоков шихты и газа усиливали колебания силового взаимодействия и теплового состояния, вызываемых непостоянством качества шихты, а инерционность процесса уменьшала эти колебания. В связи с этим выявление изменений в интенсивности движения потоков шихты и газа путем учета и контроля количества подаваемого в печь дутья, выходящего колошникового газа, загружаемых материалов и получающихся продуктов плавки является основой повышения ровности схода шихты, точности прогнозирования изменения состава чугуна, теплового состояния печи.

Силовое взаимодействие и тепловое состояние, выражающееся через температурное поле печи, изменялись вследствие отклонений хода процессов. После этого они сами создавали условия для дополнительных отклонений этих процессов. Во время разогрева печи повышалась температура во всей печи, изотермы перемещались вверх, что обуславливало приближение вертикального давления шихты к предельной величине, временное повышение интенсивности восстановления, плавления, степени взаимодействия CO_2 с углеродом кокса. Влияние нагрева на ход процессов обуславливало возможность обратной связи изменений показателей хода процессов восстановления с показателями нагрева печи. Например, наблюдалось уменьшение степени косвенного восстановления при росте содержания кремния в чугунах. Основные изменения хода процессов при этом происходили в нижней половине (по объему) зоны потока материалов. Поэтому сдвиг во времени отклонений показателей теплового состояния и хода процессов восстановления в среднем составлял 2–3 часа. Изменения хода процесса с обратной связью показателей восстановления и теплообмена возникали вследствие некомпенсированных изменений содержания мелочи в шихте, неучтенных колебаний количества и состава железорудного сырья.

Прямая связь рассматриваемых показателей имела место при изменении восстановимости, контакта между твердыми и газообразными компонентами, распределения потоков шихты и газа при допустимых значениях силового взаимодействия потоков шихты и газов и характеризовалась разогревом печи с ростом

степени косвенного восстановления и степени использования химической энергии газа. При прямой связи изменение теплового состояния являлось функцией использования энергии газов в процессах восстановления, при обратной – наоборот, использование энергии газа менялось вследствие изменения температур и состояния шихты. Активное регулирование по данным о свойствах компонентов шихты и параметрам дутья уменьшало число случаев обратной связи и повышало надёжность алгоритмов, учитывающих только прямую связь.

Наличие прямой и обратной связи изменений показателей хода процессов создавала необходимость расшифровки причин отклонений контролируемых параметров колошникового газа, в том числе его состава. Эту необходимость не удавалось исключить заменой общих тепловых балансов зональными.

На печах АО «Уральская Сталь» средняя продолжительность неустановившегося хода процессов, то есть переходного состояния, при изменении качества и распределения шихты была равна времени, в течение которого шихта в зоне потока менялась 2–3 раза. Такой срок обусловлен тем, что во время первой смены параметры фурменного газа соответствовали ранее имевшимся условиям, а к концу второй смены они приближались к значениям их для установившегося хода процессов на новой шихте.

При изменении параметров дутья время переходного состояния было меньше на время смены шихты в зоне потока. Изменения силового взаимодействия потоков шихты и газа и хода процессов восстановления отражались на тепловом состоянии горна со сдвигом во времени, равном в среднем времени пребывания материалов в зоне с практически полным использованием тепла. Эта зона составляет $\frac{2}{3}$ – $\frac{3}{4}$ зоны потока материалов.

При средней продолжительности неустановившегося хода 8–12 часов длительность периодов работы доменных печей с постоянной тенденцией нагрева, то есть полупериодов колебания состава (температуры) чугуна, в доменных печах АО «Уральская Сталь» составляет 8–25 часов. За такое время возможно наложение особенностей одного неустановившегося хода на особенности другого, что усложняет расшифровку причин изменения состава газа. Усложнение происходит и вследствие отсутствия монотонности изменения состава газа после изменения качества шихты. На рис. 1 показано для примера изменение состава газа после уменьшения температуры агломерата по опыту ПАО «ММК».

Содержание CO_2 , например, существенно снижалось в первые 4 часа, затем повышалось в течение 3 часов и вновь снижалось в последующие 5 часов. В дальнейшем вновь появлялась тенденция роста CO_2 , то есть содержание CO_2 снижалось по кривой с затухающими колебаниями.

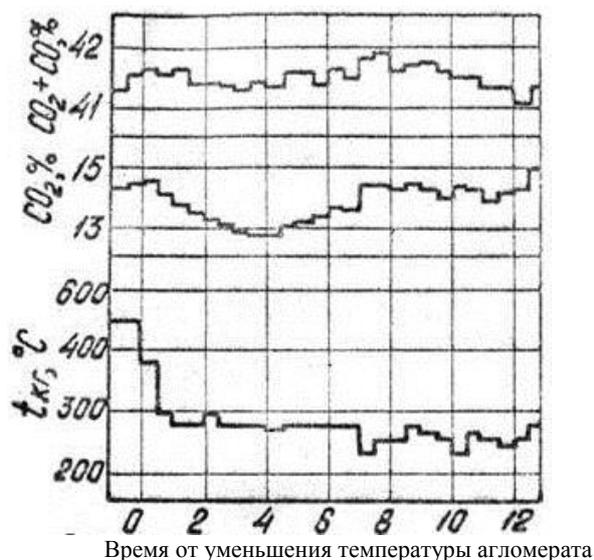


Рис.1. Изменение температуры (t_{kr}) и состава ($CO_2, CO + CO_2$) колошникового газа при уменьшении температуры агломерата

Длительность неустановившегося силового взаимодействия потоков шихты и газа, хода процессов тепло- и массообмена в доменной печи существенно рассеивается во времени – на время до 3–4 смен материалов в зоне потока. Это обусловлено инерционностью процесса и отклонениями от установившегося движения кокса в нижней части печи, сопровождающимися изменениями теплового состояния.

Наблюдается обратная связь отклонений содержания кремния в чугуна с выходом чугуна за выпуск. Фактическое отклонение выхода чугуна обычно превышает его величину, вычисленную по изменениям количества загруженных подач. В исследованиях в АО «Уральская Сталь» отклонения содержания кремния в чугуна, равные 0,3% и более, сопровождались изменением выхода чугуна на 1 т загруженного кокса в среднем на 16,6%. Отклонения выхода чугуна получаются в текущем или в предшествующем выпуске и это усиливает тенденцию изменения нагрева печи. Так, при снижении нагрева печи выход чугуна увеличивается за счет удаления некоторого количества кокса из нижней части зоны потока за ее пределы, роста вертикального давления шихты, сопровождающегося увеличением глубины погружения кокса в чугуна. Фактическая рудная нагрузка на фурмах при этом становится больше, что усиливает тенденцию к похолоданию. Повышение нагрева сопровождается противоположными изменениями.

Выход чугуна существенно отклоняется в одном направлении обычно лишь для одного выпуска, поэтому при прогнозировании состава чугуна следующего выпуска можно исходить из малой вероятности существенного отклонения выхода, имевшегося в предшествующем выпуске. Полезно сопоставление фактического и расчетного выхода для прогноза состава чугуна, так как фактический выход чугуна

обычно отклоняется в том же направлении, что и расчетный, но в большей степени.

Рассеивание во времени длительности переходного периода и наложение особенностей разных тенденций делают необходимым уточнение влияний переходных процессов в схемах регулирования. Так как вывод и ввод кокса в нижнюю часть зон потока изменяет параметры фурменного газа и влияет на скорость схода шихты, то длительность переходного состояния может быть уточнена по другим, обычно контролируемым технологическим параметрам: температуре колошникового газа, частоте забора подач, поступлению дутья и выходу газа.

Замеряемые количества дутья и газа дают возможность вычислить показатели прямого восстановления без использования данных о составе колошникового газа. Расход дутья и выход газа совместно с данными о количестве загруженных материалов позволяют судить об отклонениях теплового баланса. Существенным отклонениям содержания кремния в чугуна в АО «Уральская Сталь» соответствовало аналогичное, с некоторым опережением, изменение расхода дутья на единицу загружаемой шихты (рис. 2).

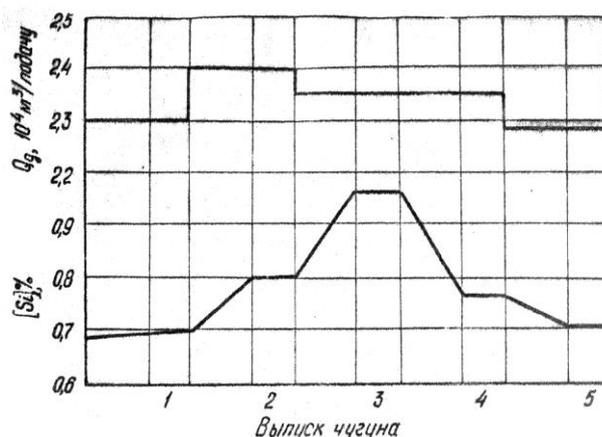


Рис. 2. Характер изменения расхода дутья на одну подачу (Q_g) и содержание кремния в чугуна

Обработка данных по доменным печам АО «Уральская Сталь» показывает, что замеры расхода горячего дутья и выхода колошникового газа позволяют иметь информацию, дублирующую состав колошникового газа, то есть повысить надежность информации, получение которой обычно вызывает наибольшие трудности. Кроме этого, используя эти данные совместно с данными о количестве загруженных материалов, можно судить о причинах изменения силового взаимодействия потоков шихты и газа, отклонений теплового баланса отдельных зон печи, в частности зон с полным (выше 800–900 $^\circ C$) и частичным (ниже 800–900 $^\circ C$) использованием тепла газового потока.

Рассматриваемые отклонения теплового баланса в АО «Уральская Сталь» связаны с использованием энергии газа, проходящегося на единицу проплавления

мой шихты. Поэтому изменение теплового баланса нижней ступени теплообмена сопровождается аналогичным изменением теплового баланса верхней. Показатели теплообмена в них находятся в соответствии друг с другом, например, температура (состав) чугуна с температурой колошниковога газа. При установившейся работе доменных печей связь этих показателей малозаметна, а во время резких колебаний теплового состояния – существенна.

Температура колошниковога газа соответствует избытку тепла в верхней ступени теплообмена и разности температур шихты и газа на границе верхней зоны с зоной замедленного теплообмена. Эта разность температур на границе зон заметно увеличивается с приближением вертикального давления шихты к предельной величине при росте степени неравномерности распределения шихты и газа по сечению печи, сопровождаемая образованием каналов.

Из вышеизложенного видна роль температуры колошниковога газа при прогнозировании колебаний в ходе шихты и теплового состояния, обусловленных временными отклонениями отношения интенсивностей потоков шихты и газа от установившихся величин в АО «Уральская Сталь». Важными являются также общий и частные перепады давления газа в печи, интенсивность излучения из фурменных очагов.

Прогноз быстрых отклонений теплового состояния по указанному комплексу исключает влияние систематических ошибок в контроле состава проплавляемых материалов. Для расчетов пригодны имеющиеся замеры расходов холодного дутья и выхода газов после его очистки. Более точные результаты расчетов могут быть получены путём выполнения замера расхода в воздухопроводе горячего дутья, а выхода газа – непосредственно после печи (в газоотводах). Приемлемо использование результатов замера расхода воздуха по фурмам. При отсутствии регулирования его пригодны данные, полученные по части фурм (не менее 1/2), так как распределение воздуха по фурмам относительно устойчиво.

Для переходных состояний доменного процесса температура (интенсивность излучения) фурменных очагов может находиться в прямой связи с нагревом горна (температурой и составом чугуна), так как на температуру очагов влияют температура и количество кокса, сходящего в очаги, температура чугуна, температура и состав шлака. Установившаяся работа с различным нагревом может не отличаться температурой фурменных очагов или отличаться незначительно.

Излучения из фурменных очагов подвержены частым и значительным колебаниям, однако многие колебания и общая тенденция изменения обычно совпадают для различных фурм (рис. 3). Изменения интенсивности излучения на двух фурменных очагах оказались качественно аналогичными в течение 89 % времени. Такое высокое совпадение обусловлено тем,

что между отдельными фурменными очагами существует технологическая и газодинамическая связь.

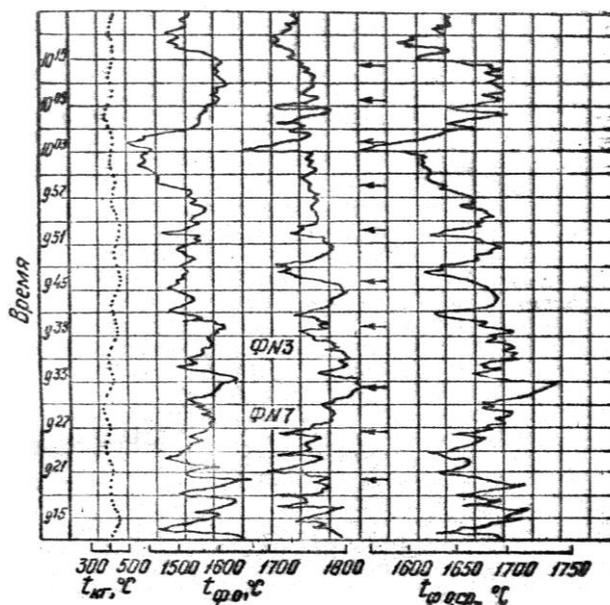


Рис. 3. Температура отдельных фурменных очагов $t_{\text{фo}}$, средняя для двух очагов $t_{\text{фo ср}}$ и средняя температура колошниковога газа $t_{\text{кр}}$

Поэтому для контроля теплового состояния доменной печи может оказаться достаточным замер температуры в 1/4–1/2 общего количества очагов.

Между содержанием кремния в чугуне и средней между выпусками температуры фурменных очагов установлены связи двух видов. Связи первого вида заключаются в том, что состав чугуна и температура фурменных очагов существенно колеблются около средних значений (рис. 4), находясь в соответствии между собой. При связях второго вида (рис. 5) температура фурменных очагов колеблется в узком интервале вблизи средних значений, не переходя их. Состав чугуна при этом изменяется в соответствии с соотношением текущей и средней температур очагов. Это значит, что при снижении текущего значения температуры очага чугун становится холоднее и наоборот.

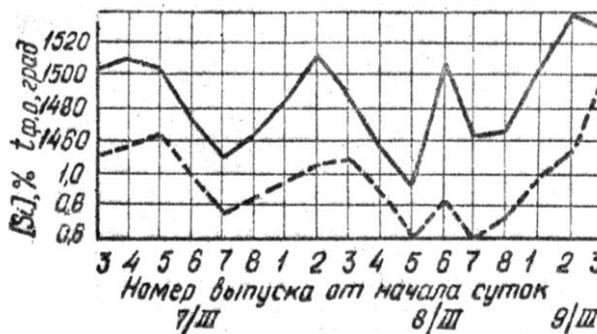


Рис. 4. Первый вид связи температуры фурменных очагов и содержания кремния в чугуне

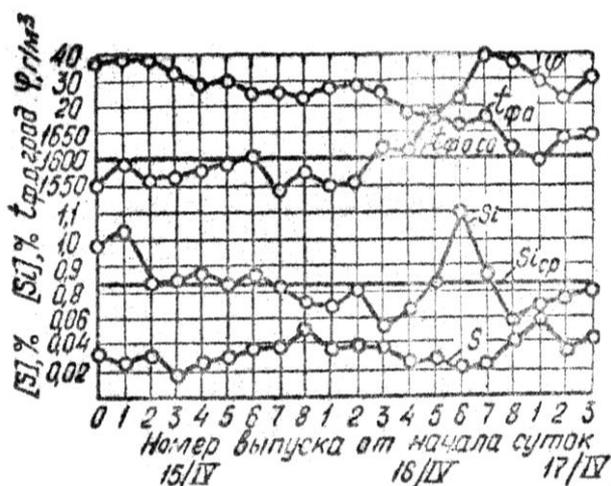


Рис. 5. Второй вид связи температуры фурменных очагов и содержания кремния в чугуне (Ф_д – влажность дутья)

Установленная связь указывает на возможность регулирования теплового состояния по температуре фурменных очагов. По температуре очагов регулирующие воздействия могут быть предприняты раньше, чем обычно, использование ее обеспечивает более своевременное регулирование теплового состояния. В течение 93 % времени желательные по температуре очагов воздействия были целесообразны по условиям движения шихты и газов. В 88,6 % случаев повышение общего перепада давления газа было связано с ростом температуры фурменных очагов.

Изменение влажности дутья вызывает затухающее колебание температуры фурменных очагов со снижением ее среднего уровня (рис. 6).

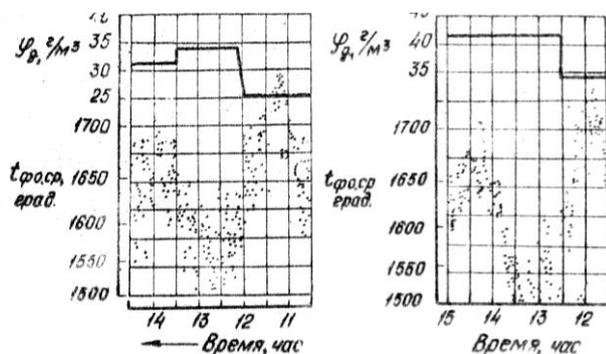


Рис. 6. Снижение температуры фурменных очагов при повышении влажности дутья

В первые 5–10 мин после повышения влажности температура очага интенсивно снижалась, затем имелся резкий скачок вверх, после которого продолжалось снижение температуры. Через 20–30 мин температура очага почти восстанавливалась, после чего вновь снижалась. Колебательное изменение температуры очага обусловлено газодинамическими особенностями фурменного очага и изменением хода про-

цессов теплообмена и восстановления. В среднем повышение влажности дутья на 1 г/м³ уменьшало температуру фурменных очагов на 9–16 град чрез 10–15 мин (средняя величина 12,3 град) и на 3,1–4,6 град (средняя величина 3,9 град) чрез 2–76 часов.

Заключение

Для условий работы доменных печей АО «Уральская сталь» исследовали особенности неустановившегося теплового состояния. При изменении качества и распределения шихты средняя продолжительность переходного периода была равна времени, в течении которого шихта в зоне потока менялась 2–3 раза.

При изменении параметров дутья время переходного состояния было меньше на время смены шихты в зоне потока. Изменения силового взаимодействия потоков шихты и газа и хода процессов восстановления отражались на тепловом состоянии горна со сдвигом во времени, равном в среднем времени пребывания материалов в зоне с практически полным использованием тепла. Эта зона составляет 2/3–3/4 зоны потока материалов.

Прогноз быстрых отклонений теплового состояния исключает влияние систематических ошибок в контроле состава проплавляемых материалов.

Список литературы

1. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи от последовательности размещения их в бункере БЗУ / Сибатуллин С.К., Теплых Е.О., Харченко А.С., Махмутов Р.Ф., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. // Теория и технология металлургического производства. 2012. № 12. С. 16-21.
2. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 46-56.
3. Промывка горна доменной печи кремнезёмомарганцовистой рудой ниязгуловского месторождения / Бигеев В.А., Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Панишев Н.В., Потапова М.В., Лунев У.Д. // Теория и технология металлургического производства. 2018. № 3 (26). С. 12-16.
4. Технологические параметры доменной плавки при локальной промывке горна кремнезёмомарганцовистым материалом / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Малиханов Ю.С., Игликова У.Ж., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. // Теория и технология металлургического производства. 2020. № 2 (33). С. 11-17.

5. Большаков В.И. Направления исследований и научных разработок института черной металлургии НАН Украины // Металлург. 2011. № 1. С. 11-13.
6. Вайсберг Л.А., Коровников А.Н., Подгородецкий Г.С. Совершенствование систем шихтоподготовки в доменном производстве // Черные металлы. 2017. № 8. С. 24-27.
7. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спириин, А.А. Полинов // Металлург. 2016. № 6. С. 36-42.
8. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Чернов В.П., Бегинюк В.А. // Черные металлы. 2017. № 8. С. 27-33.
9. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. № 1. С. 37-44.
10. Улучшение работы доменной печи кратковременным уменьшением расхода природного газа / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Харченко Е.О., Сибатуллина М.И., Миникаев С.Р., Бегинюк В.А. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 2 (1406). С. 16-20.
11. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов А.А. и др. // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 1 (14). С. 23-25.
12. Распределение дутья по воздушным фурмам доменной печи / Полинов А.А., Павлов А.В., Онорин О.П., Спириин Н.А., Гуриин И.А. // Металлург. 2018. № 5. С. 23-27.
13. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК «Азовсталь» / Д.А. Тонких, С.А. Кариков, А.К. Тараканов и др. // Металлург. 2013. № 9. С. 42-48.
14. Исследование влияния ввода железомagneзиальной руды в агломерационную шихту на показатели доменной плавки / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Миникаев С.Р., Игликова У.Ж., Полинов А.А., Гушин Д.Н. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 9. С. 910-920.
15. Структура карбонитридного гарнисажа, образующегося в горне и лещади доменной печи / В.А. Гостенин, А.Л. Мавров, В.П. Гридасов, С.К. Сибатуллин // Сталь. 2007. № 2. С. 29–30.
16. Качула Б.В., Кобелев В.А. Особенности металлургических свойств титаномагнетитового железорудного сырья и их влияние на процесс доменной плавки // Проблемы комплексной переработки титаномагнетитов Южного Урала. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати. 2001. С. 57–62.
17. Изучение металлургических свойств титаномагнетитового сырья / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, Ю.А. Чесноков // Черная металлургия. 2015. № 12 (1392). С. 26-30.
18. Сравнительный технологический анализ систем контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи / А.Н. Дмитриев, М.О. Золотых, К. Чэнь, Г. Ю. Витькина // Черная металлургия. 2018. № 8 (1424). С. 82-92.
19. Исследование гарнисажа и футеровки в горне доменной печи № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (сообщение 2) / А.М. Коверзин, В.Г. Щипицын, А.В. Ващенко, А.С. Близнюков, М.Р. Садрадинов, А.Р. Макавецкас, Ю.А. Фищенко // Черная металлургия. 2018. № 9 (1425). С. 9-25.
20. Исследование состава гарнисажа в горне доменной печи Косогорского металлургического завода, выплавляющей ферромарганец с использованием шунгита (сообщение 1) / И.Э. Шепетовский, А.Г. Шалыгин, М.Р. Садрадинов, Р.И. Нуриев, А.С. Близнюков, А.Р. Макавецкас, Ю.Ю. Фищенко // Черная металлургия. 2019. № 4. Т. 75. С. 432-448.
21. Лялюк В.П., Товаровский И.Г. Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменных зон // Черные металлы. 2003. № 11. С. 13-16.
22. Анализ процессов доменной плавки при обогащении дутья кислородом / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк, А.Е. Меркулов и др. // Бюллетень. Черная металлургия. 2011. № 5. С. 20-33.
23. Интенсификация работы доменных печей подбором оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, А.В. Чевычелов и др. // Сталь. № 2. 2012. С. 7-11.
24. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Анализ процессов доменной плавки при варьировании температуры дутья в широком диапазоне // Бюллетень. Черная металлургия. 2011. № 4. С. 36-49.
25. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева / С.А. Фещенко, В.И. Плешков, Б.Н. Лизунов и др. // Металлург. № 11. 2007. С. 44-48.
26. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки / Н.А. Спириин, Л.Ю. Гилева, В.В. Лавров и др. // Бюллетень. Черная металлургия. 2014. № 6. С. 45.
27. Исследование переходных процессов в доменной печи на основе анализа схемы теплообмена / Спи-

- рин Н.А., Онорин О.П., Истомина А.С., Гурин И.А. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 2. С. 132-139.
28. Особенности переходных процессов доменной плавки / Онорин О.П., Спиринов Н.А., Истомина А.С., Лавров В.В., Павлов А.В. // Металлург. 2017. № 2. С. 47-51.
29. Нестационарный теплообмен в зоне расплава и особенности переходных процессов в доменной печи / Ярошенко Ю.Г., Швыдкий В.С., Спиринов Н.А., Лавров В.В., Носков В.Ю. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 9. С. 672-676.
30. Анализ переходных процессов теплообмена в движущемся слое / Спиринов Н.А., Овчинников Ю.Н., Попов Г.Г. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1988. № 2. С. 128-132.
31. Сибатуллин С.К. Выявление и реализация скрытых резервов энерго- и ресурсосбережения при выплавке чугуна в доменных печах: автореф. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2005. 36 с.

Сведения об авторах

Искаков Ильдар Фаритович – управляющий директор АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: i.iskakov@uralsteel.com.

Куницын Глеб Александрович – д-р техн. наук, технический директор АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: g.kunitsyn@metalloinvest.com.

Сибатуллин Салават Камилевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: 10tks@mail.ru.

Харченко Александр Сергеевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru.

Сибатуллина Маргарита Ильдаровна – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Макарова Ирина Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.irina1976@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PECULIARITIES OF UNSECURED HEAT STATE OF BLAST FURNACES OF JSC "URAL STEEL"

Iskakov Idar F. – Managing Director of JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia. E-mail: i.iskakov@uralsteel.com.

Kunitsyn Gleb A. – Dr. Sci., Technical Director of JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia. E-mail: g.kunitsyn@metalloinvest.com.

Sibatullin Salavat K. – Dr. Sci., Associate Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: 10tks@mail.ru.

Kharchenko Alexander S. – Dr. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: as.mgtu@mail.ru.

Sibatullina Margarita I. – postgraduate student of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Makarova Irina V. – Cand. tech. Sci., Associate Professor, Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.irina1976@mail.ru.

Abstract. For the operating conditions of blast furnaces of JSC "Ural Steel", features of the thermal state in the course of unsteady processes were investigated. The immediate reasons were fluctuations in the quality of the charge, regulation of the temperature and composition of the blast, as well as the distribution of materials and gases over the cross section of the furnace, which is superimposed on the influence of changes in the movement of materials in the descent funnels and below the tuyere level. With a change in the quality and distribution of the charge, the average duration of the transition period was equal to the time during which the charge in the flow zone changed 2 - 3 times. When the blast parameters were changed, the time of the transition state was less by the time of changing the charge in the flow zone. Changes in the force interaction of the mixture sweat and gas and the course of the reduction processes were reflected in the thermal state of the hearth with a shift in time equal to the average residence time of materials in the zone with almost complete use of heat. This zone constitutes on $\frac{2}{3}$ of material flow zones. The forecast of rapid deviations of the thermal state excludes the influence of systematic errors in the control of the composition of the melted materials.

Key words: blast furnace, cast iron, slag, thermal state, unsteady course of processes, transition period.

Ссылка на статью:

Особенности неустановившегося теплового состояния доменных печей АО «Уральская Сталь» / И.Ф. Искаков, Г.А. Куницын, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, М.И. Сибатуллина, И.В. Макарова // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 11-18.
Iskakov I.F., Kunitsyn G.A., Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Sibagatullina M.I., Makarova I.V. Peculiarities of unsecured heat state of blast furnaces of JSC "Ural Steel". *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 11-18.

УДК 669.1

Искаков И.Ф., Валиахметов А.Х., Кузнецов М.С., Проскуровский Д.А., Шепелев Д.А.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В 120-ТОННЫХ ГИБКИХ МОДУЛЬНЫХ ПЕЧАХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Аннотация. АО «Уральская Сталь» является металлургическим предприятием с полным циклом. Основной продукцией комбината является листовой прокат, блюмовая и круглая заготовка, чушковый чугун. В состав комбината входит доменный цех, который имеет 4 доменные печи. Сталь выплавляется в двух дуговых сталеплавильных печах ДСП-120, которая затем разливается на блюмовой и слябовой МНЛЗ.

Профицит жидкого чугуна в АО «Уральская Сталь», а также нестабильная экономическая ситуация на рынке – резкое колебание цен на металлический лом, чушковый чугун, графитированные электроды подтолкнули к внедрению технологии выплавки стали в ДСП с возможностью варьирования расхода жидкого в широком пределе от 0 до 90%.

Ключевые слова: доменная печь, сталь, дуговая сталеплавильная печь, производительность печей, чугун.

Таблица 1

Параметры ДСП

№ п/п	Параметры	До реконструкции	После реконструкции
1	Производительность 2-х печей, млн т/год	2,4	2,05
2	Масса жидкой стали на выпуске, т	115-120	115-120
3	Остаток металла («болота») в печи, т	20	20
4	Цикл плавки, мин	50	54
5	Продолжительность работы «под током», мин	28	0
6	Расход кислорода, м ³ /т	50	65
7	Заливка чугуна, кол-во ковшей	1	2
8	Длительность заливки чугуна, мин	12-15 (сверху 5 мин)	25-30 мин
9	Скорость заливки чугуна, т/мин	4-6	4-6
10	Количество фурм O ₂ /инжекторов С, шт	4/2	4/2
11	Интенсивность продувки кислородом, м ³ /ч	3000	3500



Рис. 1. Заливка жидкого чугуна в ДСП

В результате проведенной реконструкции вместимость печей не изменилась и составила 120 т жидкого металла на выпуске при весе «болота» около 20 т. Основные параметры ДСП до и после модернизации приведены в табл. 1.

Заливку жидкого чугуна производят через заливочные желоба, установленные сбоку от рабочего окна ГМП (рис. 2).

Для заливки жидкого чугуна в ДСП используется напольная машина слива чугуна (НМС) (рис. 3), при помощи которой имеется возможность регулировать скорость заливки жидкого чугуна в печь. НМС с заливочным ковшем с жидкими чугуном по рельсам подъезжает к печи, далее ковш поднимается и наклоняется, осуществляя перелив чугуна по специальному желобу, установленному сбоку от рабочего окна. Скорость заливки чугуна регулируется сталеваром печи.

После окончания заливки напольная машина отъезжает от печи в позицию смены ковша и, при необходимости, после замены ковша проводится заливка чугуна из второго ковша.

Для увеличения интенсивности продувки ванны кислородом каждую печь оснастили четырьмя комбинированными газокислородными горелками и двумя угольными инжекторами (рис. 4). Общая интенсивность продувки ванны кислородом составила около 14 тыс. м³/ч.

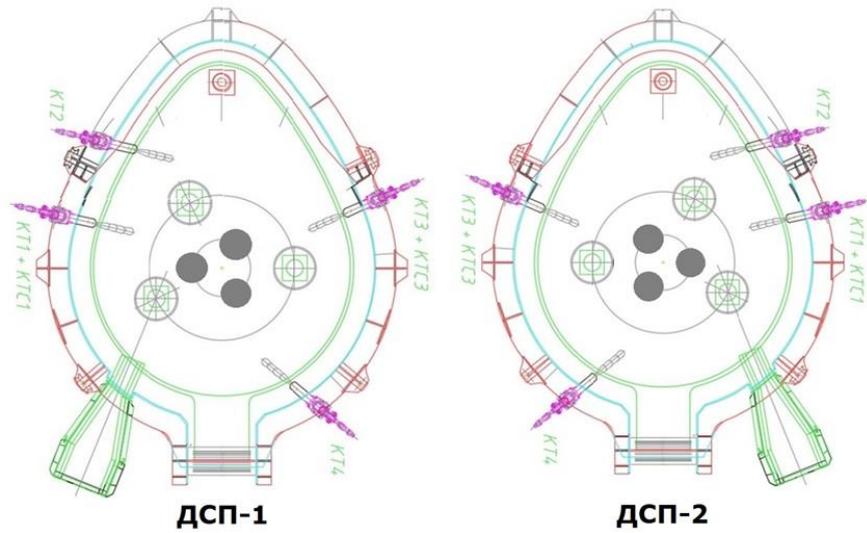


Рис. 2. Вид сверху на ДСП

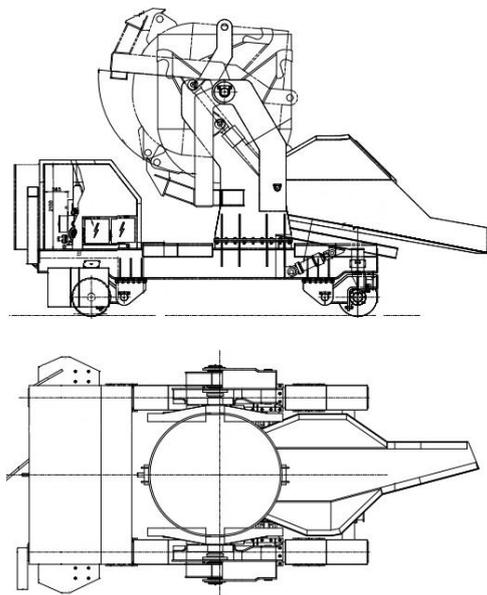


Рис. 3. Напольная машина слива чугуна

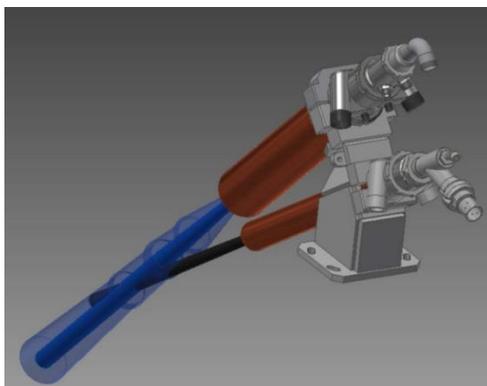


Рис. 4: а – газокислородная фурма-горелка и угольный инжектор;
б – наконечник газокислородной фурмы-горелки

Для перехода с режима работы ДСП на режим ГМП выполняют замену свода. Для выплавки стали в режиме ДСП используется стандартный водоохлаждаемый свод с огнеупорной центральной частью, для выплавки в режиме ГМП применяют полностью водоохлаждаемый свод без отверстий под электроды (рис. 5). Вся процедура замены занимает не более двух часов.



Рис. 5. Полностью водоохлаждаемый свод для работы печи в режиме ГМП

Учитывая большой объем работ и необходимость остановки части оборудования, модернизация была проведена поэтапно: сначала в феврале 2019 г. в эксплуатацию была введена ДСП №2, а затем в сентябре 2019 г. запущена ДСП №1. С момента запуска

печей в эксплуатацию по технологии без использования электроэнергии было выплавлено металла:

- в 2019 году – 597300 т (40% от годового объема);
- в 2020 году – 415386 т (30% от всего металла).

Кроме конструктивных изменений печей была изготовлена новая система подачи в печи материалов-охладителей, которые непрерывно присаживаются по ходу плавки. В качестве материалов-охладителей используют окисленные окатыши или ГБЖ. Для этого был смонтирован специальный бункер, из которого по конвейеру с заданной скоростью материалы подают в печь.

Технология выплавки стали в режиме ГМП заключается в последовательности операций, при которой в ГМП заливается чугун с заданной скоростью, при этом параллельно проводится интенсивная продувка ванны кислородом и для предотвращения избыточного перегрева ванны проводится присадка материала-охладителя (окатышей или ГБЖ). Энерготехнологический режим плавки представлен на рис. 6.

В ходе отработки технологии выплавки стали в модернизированных печах технология дорабатывалась и корректировалась.

По результатам проведенных плавок установлено оптимальное соотношение чугуна и ГБЖ при шихтовке плавки.

Установлен оптимальный вес жидкого чугуна для заливки из первого и второго заливочного ковша.

При работе на новых печах удалось достичь следующих показателей (табл. 2).

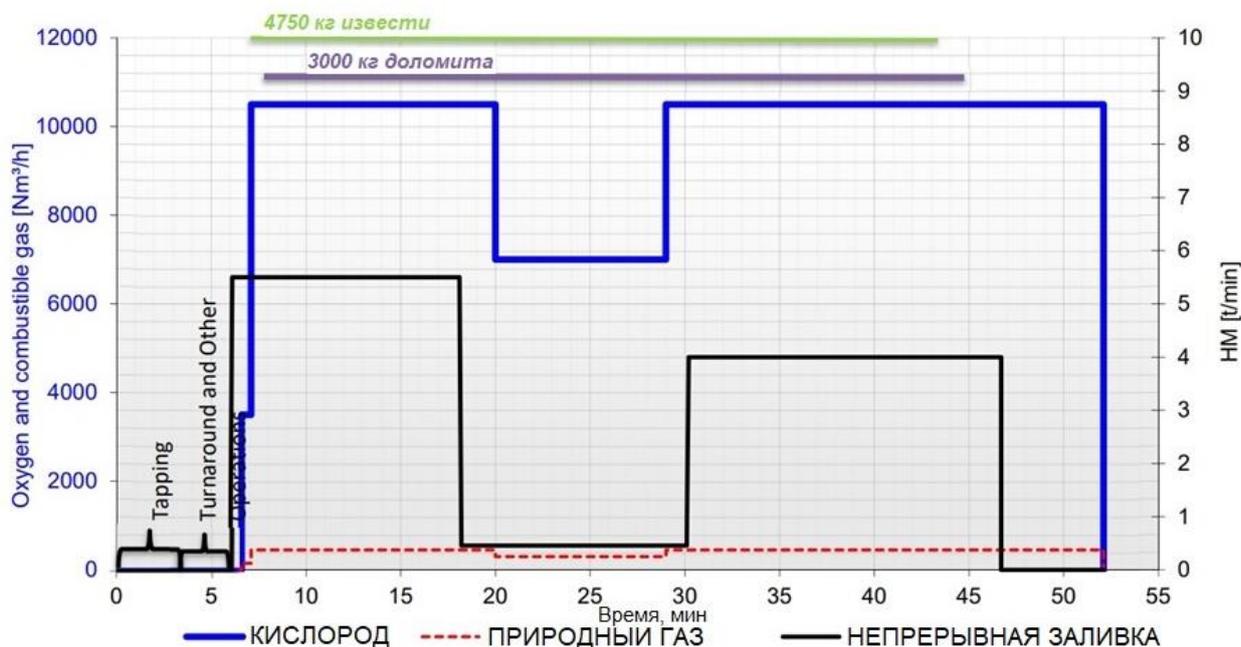


Рис. 6. Энерготехнологический режим плавки в ГМП при использовании 90% жидкого чугуна

Показатели работы ДСП

№ п/п	Параметры	До	После
1	Доля лома в шихте, %	50–55	0
2	Доля чугуна в шихте, %	40–45	90–95
3	Цикл плавки, мин	50	54
4	Время «под током», мин	28	0
5	Расход электродов, кг/т	1,35	0
6	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	230	0
7	Расход кислорода, м ³ /т	45–50	65
8	Содержание примесей цветных металлов (Cr, Ni, Cu), % каждого	0,05–0,15	0,01
9	Расход металлошихты, кг/т	1156	1145
10	Уровень шума от печи	Значительный	Отсутствует
11	Нагрузка на газоочистку	Пиковое образование отходящих газов	Распределенное во времени образование отходящих газов

Внедрение технологии гибкой работы печей в режиме ДСП/ГМП позволяет получать АО «Уральская Сталь» максимальный эффект от использования различного вида сырья в зависимости от ситуации на рынке. Переход на ГМП технологию позволил повысить гибкость и эффективность производства, снизить

себестоимость выпускаемой продукции, уменьшить количество выбросов.

На сегодня дуговые печи АО «Уральская Сталь» являются самыми гибкими сталеплавильными агрегатами в России и странах постсоветского пространства.

Сведения об авторах

Искаков Ильдар Фаритович – Управляющий директор АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

Валиахметов Альфед Хабибуллаевич – главный сталеплавильщик АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

Кузнецов Максим Сергеевич – начальник управления технического сопровождения сталеплавильного производства АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

Проскуровский Дмитрий Адольфович – начальник ЭСПЦ АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

Шепелев Денис Сергеевич – главный специалист по электросталеплавильному производству АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FEATURES OF STEEL MAKING TECHNOLOGY IN 120-TON FLEXIBLE MODULAR FURNACES JSC "URAL STEEL"

Iskakov Idar F. – Managing Director of JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia.

Valiakhmetov Alfed Kh. – Chief Steelmaker of JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia.

Kuznetsov Maksim S. – Head of the Department of Technical Support of Steelmaking Production of JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia.

Proskurovsky Dmitry A. – Head of EAFS of JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia.

Shepelev Denis S. – Chief Specialist for Electric Steel-Making Production at JSC “Ural Steel”, Novotroitsk, Russia.

Abstract. JSC “Ural Steel” is a full-cycle metallurgical enterprise. The main products of the plant are sheet metal, bloom and round billets, pig iron. The plant includes a blast furnace shop, which has 4 blast furnaces. Steel is smelted in two electric arc steel-making furnaces of 120 tons capacity, which is then poured into bloom and slab continuous cast-

ing machines. The surplus of liquid iron in JSC "Ural Steel", as well as the unstable economic situation on the market - sharp fluctuations in prices for scrap metal, pig iron, graphite electrodes pushed for the introduction of steelmaking technology in EAF with the possibility of varying the flow rate of liquid in a wide range from 0 to 90 %. In 2018, a contract with TENOVA (Italy) for the supply of equipment for steelmaking in EAF with zero electricity consumption was signed. In 2019, the equipment was modernized in the electric arc furnace shop of "Ural Steel". Instead of arc furnaces operating according to the classical technology, the ESFC received two flexible modular furnaces (GMF), capable of operating in both EAF and oxygen converter modes. Now it is possible to use up to 90-95% of liquid iron and melting without using electricity. Electric melting came to be known as GMF melting.

Key words: full-cycle metallurgical enterprise, bloom and round billets, slab continuous casting machines, flexible modular furnaces.

Ссылка на статью:

Особенности технологии выплавки стали в 120-тонных гибких модульных печах АО «Уральская Сталь» / И.Ф. Исаков, А.Х. Валиахметов, М.С. Кузнецов, Д.А. Проскуровский, Д.А. Шепелев // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2 (37). С. 19-23.
Iskakov I.F., Valiakhmetov A.Kh., Kuznetsov M.S., Proskurovsky D.A., Shepelev D.S. Features of steel making technology in 120-ton flexible modular furnaces JSC "Ural Steel". *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, Vol. 37, No. 2, pp. 19-23.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 669.14.018.292:621.74.047

Бедринов А.И., Куницын Г.А., Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Самохина О.В.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ШТРИПСА, СТОЙКОГО К СЕРОВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Аннотация. Для сооружения промышленных нефтепроводов наиболее востребованы трубы из сталей 09ГСФ и 13ХФА, соответствующие классу прочности К52. К стойкости трубной продукции и соединительных деталей промышленных нефте- и нефтепродуктопроводов и к воздействию агрессивных сред, содержащих воду и сероводород, предъявляются повышенные требования. В АО «Уральская Сталь» успешно внедрена унифицированная комплексная технология производства коррозионно-стойкого листового проката из сталей 09ГСФ и 13ХФА в широком диапазоне размерного сортамента с обеспечением требований к водородному растрескиванию по стандарту NACE TM0284 и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по методу «А» стандарта NACE TM0177. Разработаны режимы контролируемой прокатки с ускоренным последеформационным охлаждением и последующим высоким отпускком, обеспечивающие заданный уровень механических характеристик, соответствующих классу прочности К52. Для обеспечения удовлетворительной плоскостности листов рекомендованы варианты химического состава стали в зависимости от толщины готового листа. Режимы производства обеспечивают высокую хладостойкость металла и фактические значения ударной вязкости KCV⁴⁰, значительно превышающие нормативные требования. Показано, что снижение соотношения Ca/S в металле до ~0,6–1,0 при содержании серы менее 0,002 % не только не приводит к снижению коррозионной стойкости, но и минимизирует ликвационную неоднородность стали и загрязненность неметаллическими включениями. Разработанная в АО «Уральская Сталь» технология обеспечивает возможность промышленного производства коррозионно-стойкого листового проката из сталей 09ГСФ и 13ХФА в широком размерном диапазоне.

Ключевые слова: внепечная обработка, коррозионная стойкость, водородное растрескивание, сероводородное растрескивание, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение, высокий отпуск, микроструктура.

Введение

Отличительной особенностью требований, предъявляемых к трубной продукции и соединительных деталей промышленных трубопроводов для нефти и нефтепродуктов, является стойкость к воздействию агрессивных сред, содержащих воду и сероводород.

Под воздействием воды и сероводорода стальные трубы подвергаются коррозии с потерей массы и насыщению водородом. В присутствии H₂S водород, образующийся на поверхности металла в результате коррозионных процессов, проникает внутрь стали, скапливается в местах существования дефектов – неметаллические включения, примеси, дислокации – и вызывает растрескивание.

Как показали многочисленные исследования [1–4], разрушение труб, транспортирующих такие углеводороды, происходит в основном по двум механизмам:

- 1) водородное растрескивание (НІС);
- 2) сероводородное растрескивание под напряжением (SSCC).

Металл труб и штрипсов в сероводородостойком исполнении дополнительно к обычным требованиям, предъявляемым к трубам магистральных нефтепроводов, должен соответствовать целому ряду особых требований к химическому составу и технологии производства как на сталеплавильном, так и на прокатном переделах.

Производство сероводородостойкого проката возможно по сквозной (комплексной) технологии, включающей выполнение специальных мероприятий при выплавке, внепечной обработке, непрерывной разливке, а также прокатке и термообработке. Указанный комплекс мер должен обеспечить:

- повышение чистоты стали по содержанию газов, водороду и кислороду;
- минимальное легирование стали для достижения требуемого комплекса механических свойств;
- общее уменьшение количества неметаллических включений, в первую очередь вытянутых в направлении прокатки, а также максимальную их глобуляризацию, снижение содержания серы (не более 0,002 %);
- снижение ликвационной и структурной неоднородности (и в т.ч. структурной полосчатости);
- получения однородной максимально дисперсной микроструктуры.

В настоящее время для промышленных нефтепроводов наиболее востребованы штрипсы и трубы из стали марок 09ГСФ и 13ХФА по уровню прочности соответствующих классу прочности К52.

Основные технические требования на электросварные трубы классов прочности К52 для транспортировки нефтепродуктов утверждены ПАО «НК «Роснефть» и приведены в Положении компании.

Освоение производства

На протяжении 20 лет АО «Уральская Сталь» надежный поставщик штрипса из коррозионно-

стойкой стали марки 09ГСФ. Промышленные поставки штрипса из стали 09ГСФ начались в далеком 1998 году и продолжают по настоящее время. Основными потребителями являются ПАО «ЧТПЗ», АО «ВМЗ», АО «ВТЗ», АО «ЗТЗ».

Разработку химического состава, обработку режимов разлива, внепечной обработки стали, режимов контролируемой прокатки и термической обработки осуществлялись совместно со специалистами ООО «Самарский ИТЦ». Исходя из состава оборудования, в 1998 году выплавку производили в электропечах ДСП, внепечная обработка ограничивалась продувкой через фурмы аргоном с последующей разливкой стали в изложницы. Учитывая ограниченные возможности сталеплавильного цеха, к готовому листу предъявлялись соответствующие «скромные» технические требования: отсутствие требований по загрязненности стали неметаллическими включениями, содержание серы не более 0,010%, содержание фосфора не более 0,020%, требования по сплошности листов не превышали 2-го класса сплошности ГОСТ 27772, величина зерна не должна превышать 8-го номера по ГОСТ 5639. Возможности стана 2800 также были не безграничны, максимальная величина относительных обжатий чистовой прокатки не превышала 7–8%, температура окончания контролируемой прокатки составляла 770–810°C. Тем не менее к металлу предъявлялись на тот момент «революционные» требования: обеспечение после контролируемой прокатки ударной вязкости KCV⁻⁴⁰ и KCU⁻⁶⁰ не менее 59 Дж/см², металл должен быть стойким к водородному растрескиванию (коэффициент длины трещин CLR не более 6%, коэффициент ширины трещин CTR не более 3%), величина пороговой нагрузки по стандарту NASE TM 0177-90 должна быть не менее 70%. Тем не менее АО «Уральская Сталь» успешно справилось с поставленной задачей и обеспечило поставку металлопроката в установленные сроки, объем пилотного проекта составил 1200 т. В следующем 1999 году поставка составляла уже 6500 т. С того момента на АО «Уральская Сталь» прошло ряд коренных изменений в части состава основного оборудования и, соответственно, технологических возможностей по обеспечению качественных характеристик при производстве толстолистового проката. В процессе модернизации производства выполнено:

- реконструкция электропечей;
- введены в действие установка «печь-ковш» и установка по вакуумной обработке стали;
- ввод в действие слябовой установки непрерывной разлива и перевод всего производства толстого листа на использование литых слябов;
- реконструкция старых и ввод новых методических нагревательных печей;
- по проекту SMS DEMAG произведена полная замена черновой и чистовой клетей стана 2800;
- введена в эксплуатацию установка ускоренного последовательного охлаждения;

- введена в действие одиннадцатиролковая листопродвижная машина;

- общая реконструкция действующего производства, позволила автоматизировать процессы выплавки, разлива стали и процесса прокатки;

- в настоящее время по проекту Tenova введен в эксплуатацию комплекс «роликоточная печь – роликоточная машина (РТП-РЗМ)».

Переход на новую технологическую базу позволил на качественно новом уровне обеспечить производство штрипса для электросварных труб. Это касается в первую очередь обеспечения металлургической чистоты стали по неметаллическим включениям, вредным примесям и газам, узким интервалам по обеспечению химического состава, высокого уровня ударной вязкости, комплекса Z-свойств и сплошности по результатам УЗК.

Металл труб и штрипсов в сероводородостойком исполнении дополнительно к обычным требованиям, предъявляемым к трубам магистральных нефтепроводов, должен соответствовать целому ряду особых требований к химическому составу и технологии производства как на сталеплавильном, так и на прокатном переделах.

Уменьшение сегрегационной неоднородности и обеспечение чистоты металла по примесям обеспечивается применением качественных первородных материалов, глубоким рафинированием и обеспечением требований по разливу и кристаллизации слитка. Требуемая микроструктура стали ферритобейнитного класса достигается оптимальным легированием стали карбонитридообразующими элементами и производством по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением [5].

АО «Уральская Сталь» совместно со специалистами ООО «Самарский ИТЦ», а в дальнейшем с ООО «ИТ-Сервис» провели совместную работу по совершенствованию технологии производства штрипса из стали марки 09ГСФ в сероводородостойком исполнении. Итогом этой работы стала разработка Спецификации процесса производства стали марки 09ГСФ для изготовления листового проката повышенной коррозионной стойкости, включающая: выплавку полупродукта в ДСП; обработку на УКП с получением металла требуемого марочного состава с содержанием серы не более 0,002% масс.; вакуумирование, модифицирование неметаллических включений до начала и по окончании вакуумной обработки с суммарным расходом SiCa 0,6–1,0 кг/т и разливу стали на МНЛЗ.

Другая ситуация обстоит со сталью марки 13ХФА. Результаты производства опытной партии оказались отрицательными – не достигнуто нормируемое значение по ударной вязкости. В дальнейшем запросы на 13ХФА носили единичный характер, и, учитывая отрицательный опыт производства, АО «Уральская Сталь» не подтверждало такие заказы.

Тем не менее в связи с общим падением спроса на толстолистовой прокат изготовители вынуждены принимать «любые» заказы. Так произошло и с

13ХФА. Первоначально подтвержден заказ на поставку 1000 т листа толщиной 9 мм, и в дальнейшем заказы принимались на любую толщину листа без ограничения объемов.

Учитывая опыт производства 09ГСФ, основные усилия были направлены на минимизацию развития осевой ликвационной неоднородности металла при производстве слабов и подбор режимов прокатки и термической обработки, снижающих отрицательное влияние ликвационной неоднородности на стойкость металла к водородному растрескиванию.

На первом этапе разработки технологии производства 13ХФА в условиях АО «Уральская Сталь» выбран базовый химический состав с высоким содержанием ванадия, хрома, а также небольшой добавкой ниобия и никеля (табл. 1).

В дальнейшем проведена унификация режимов производства 13ХФА и 09ГСФ.

Ввиду отсутствия машины холодной правки в зависимости от толщины листа использовали два диапазона массовой доли углерода:

- для условно «тонких» профилей толщиной 8–12 мм массовая доля углерода была 0,10–0,12%;
- для условно «толстых» профилей толщиной более 12 мм массовая доля углерода была 0,07–0,09%.

Для обеспечения серийной нормы разливки на МНЛЗ профиля толщиной 12–18 мм плавил как с диапазоном углерода 0,10–0,12%, так и 0,07–0,09%.

При выплавке в ДСП емкостью 120 т получали полупродукт с низкими массовыми содержаниями углерода и фосфора: 0,04–0,07% и 0,008–0,012% соответственно. При обработке на УКП решалась задача получения металла требуемого химического состава с низким остаточным содержанием серы (0,002 % и менее). При обработке стали в вакууматоре камерного типа обеспечивалось снижение массового содержания водорода в стали до 2,0 ppm и менее. Окончательная корректировка металла по содержанию алюминия и модифицирование неметаллических включений осуществлялись по завершении вакуумной обработки. При этом остаточное содержание алюминия в стали составляло 0,025–0,035%, количество вводимого модификатора (силикокальция в виде проволоки с наполнителем из SiCa) определялось исходя из поставленной задачи выполнения критерия $Ca/S > 1,0$

для гарантированного связывания всей ликвидирующей в процессе кристаллизации серы в глобулярные включения с оболочкой из CaS [6].

Модифицирование неметаллических включений проводилось при глубокой степени десульфурации и при относительно низком расходе SiCa в два этапа: перед вакуумированием металла (0,7–1,0 кг/т) и по окончании вакуумной обработки стали (0,3–0,6 кг/т). Цель по достижении критерия $Ca/S > 1$ не ставилась, фактическое значение Ca/S находилось в диапазоне 0,5–0,8. Снижение соотношения Ca/S в металле до ~ 0,6–1,0 при содержании серы менее 0,002% не только не приводит к снижению коррозионной стойкости, но и минимизирует ликвационную неоднородность стали и загрязненность неметаллическими включениями [7].

Данный способ модифицирования обеспечивает низкую долю экзогенных включений: до 10–15% включений на основе MgO и до 10% включений, близких по составу ковшевому шлаку. Данное обстоятельство дополнительно указывает на определяющее влияние операции модифицирования вакуумированного металла на формирование типов неметаллических включений и уровень загрязненности ими металла.

После непрерывной разливки слябы направлялись на противоблоксную обработку в отапливаемых колодцах в течение 48 часов.

Другой характерной особенностью разработанной технологии было применение «относительно» высокой температуры нагрева слабов под прокатку 1200–1220 °С. Данный режим позволил провести прокатку в черновой клети при температуре 1050–1120°С, с обеспечением относительных обжатий до 15–18%. Такие обжатия позволили формировать более мелкое и равноосное аустенитное зерно после черновой стадии прокатки благодаря протеканию рекристаллизации после каждого прохода на клети дуо и в конечном результате повысить как прочностные, так и пластические свойства. Чистовая стадия прокатки осуществляется в интервале температур 800–820°С. Суммарная деформация на чистовой стадии прокатки составляет более 75%, частные обжатия за проход составляют 12–18 %.

Таблица 1

Химический состав стали марок 09ГСФ, 13ХФА

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Al	Mo	V	S	P	N
09ГСФ	не более 0,13	не более 0,70	не более 0,70	не более 0,30	0,020–0,04	не более 0,20	0,04–0,12	0,002	0,015	0,010
13ХФА	не более 0,13	0,17–0,40	не более 0,70	0,50–1,00	0,020–0,050	не более 0,30	0,04–0,10	0,002	0,010	0,009

Применение ускоренного охлаждения сразу после окончания пластической деформации обеспечивает получение мелкозернистой структуры с номером зерна 9–11. Увеличение интенсивности охлаждения позволяет получить мелкодисперсную феррито-бейнитную микроструктуру и обеспечивает нормируемую прочность, соответствующую классу прочности К52 и высокую хладостойкость штрипса. Температура конца ускоренного охлаждения назначается в зависимости от содержания углерода и толщины листа и варьируется от 650 до 580°С. Далее для снятия внут-

ренних напряжений листы проходят термическую обработку по режиму «высокий отпуск» с температурой печи по зонам 750°С. Конкретное удельное время назначалось исходя из фактического уровня механических свойств после контролируемой прокатки с УКО и варьируется от 2,5 до 5 мин/мм.

Общий объем поставки коррозионно-стойкого штрипса превысил 500 000 т.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листового проката из стали марок 09ГСФ, 13ХФА, приведен на рис. 1.

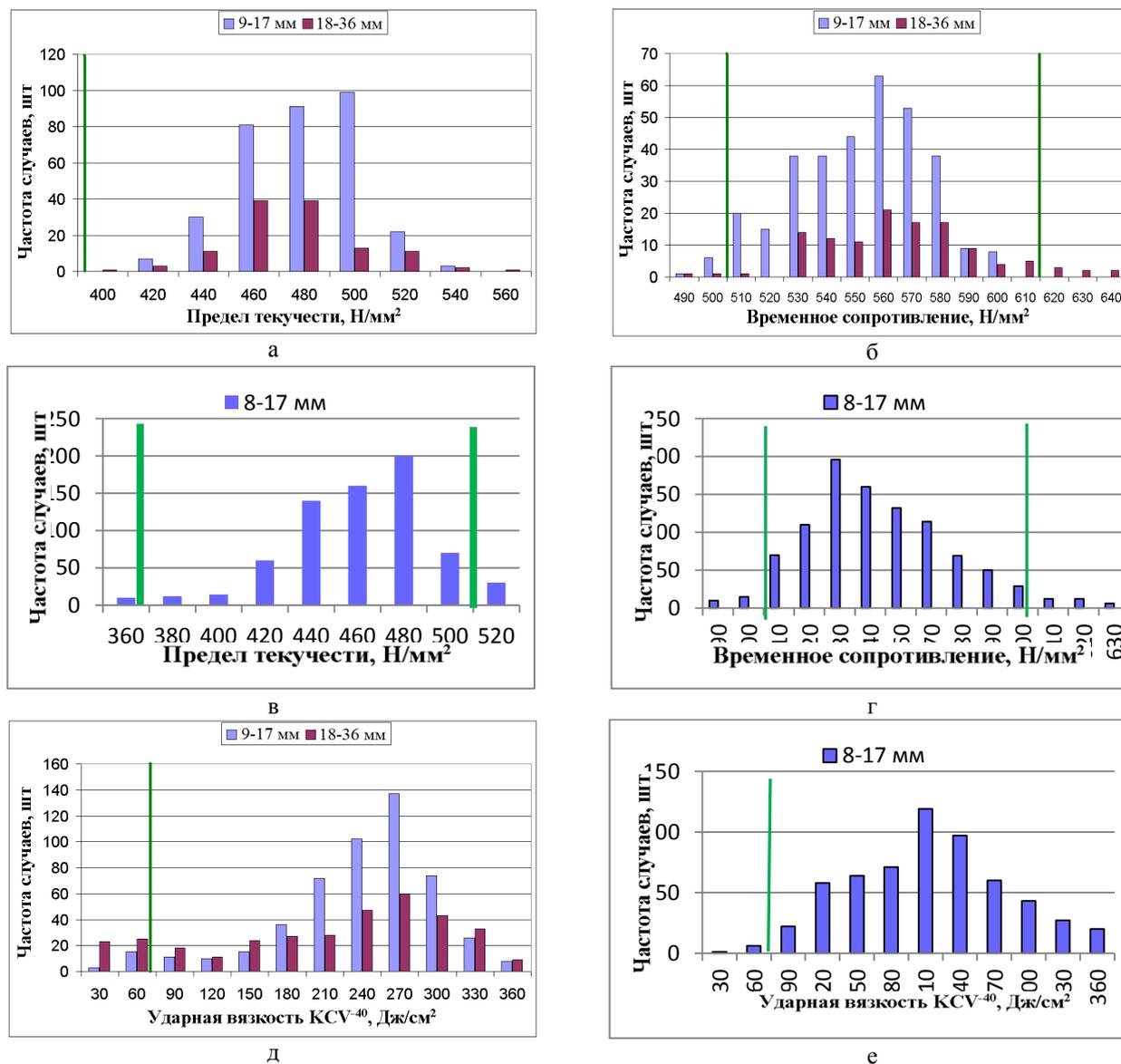


Рис. 1. Уровень механических и вязких свойств, достигнутый при производстве листов толщиной 8–36 мм:
 а – частотное распределение предела текучести 13ХФА;
 б – частотное распределение временного сопротивления 13ХФА;
 в – частотное распределение предела текучести 09ГСФ;
 г – частотное распределение временного сопротивления 09ГСФ;
 д – частотное распределение ударной вязкости КСV⁻⁴⁰ 13ХФА;
 е – частотное распределение ударной вязкости КСV⁻⁴⁰ 09ГСФ

Известно, что снижение содержания углерода благоприятно сказывается на хладостойкости стали, но приводит к снижению прочностных свойств металла. С целью обеспечения заданного уровня временного сопротивления и предела текучести снижение углерода необходимо компенсировать снижением температуры конца ускоренного охлаждения. Все это выглядит вполне естественно и закономерно, однако снижение температуры конца ускоренного охлаждения приводит к изгибанию «головной» и «донной» частей листа. В результате чего листы имеют неудовлетворительную плоскостность, данный факт особенно ярко выражен на «тонких» профилях толщиной 8–10 мм.

Возникает замкнутый круг. С одной стороны, для повышения ударной вязкости необходимо снизить содержание углерода с одновременным снижением температуры конца ускоренного охлаждения, с другой – для обеспечения удовлетворительной плоскостности необходимо, наоборот, повысить температуру конца ускоренного охлаждения и тем самым оставить содержание углерода на уровне 0,10–0,12%.

В рамках текущих заказов на АО «Уральская Сталь» произведена выплавка стали марок 09ГСФ и 13ХФА в двух диапазонах содержания углерода: 0,07–0,09 и 0,10–0,12% в широком диапазоне толщины листа.

Значения ударной вязкости KCV^{40} в зависимости от содержания углерода представлены на рис. 2.

Из представленных данных видно, что при углероде 0,10% и выше ударная вязкость KCV^{40} ведет себя нестабильно, на отдельных образцах происходит резкое падение до 20 Дж/см² и это падение тем больше, чем больше толщина листа.

Учитывая вышесказанное, технологическим регламентом определено для прокатки на листы толщиной от 8 до 10 мм выплавлять плавки с содержанием углерода 0,10–0,12%, а для прокатки на листы свыше 18 мм выплавлять плавки с содержанием углерода 0,07–0,09%. Учитывая малотоннажность заказов, для обеспечения плавочной нормы при выплавке стали в ЭСПЦ листы толщиной 11–17 мм назначаются на выплавку в обоих интервалах содержания углерода и определяются конкретным портфелем заказов.

Контролируемая прокатка в сочетании с ускоренным охлаждением обеспечивает получение однородной мелкодисперсной ферритобейнитной структуры. На рис. 3 представлена характерная микроструктура листов 13ХФА и 09ГСФ. Соотношение структурных составляющих: для 13ХФА – бейнит 40%, феррит 55%, перлит 5%; для 09ГСФ – бейнит 60%, феррит 35%, перлит 5%.

Оценка микроструктуры производится автоматическим методом по ГОСТ 5639-82 путем процентного соотношения площади, занятой зернами различных номеров, при помощи системы анализа изображения SIAMS 700, OLYMPUS GX51. Оценка проводится при увеличении $\times 500$ и $\times 100$ по толщине листа.

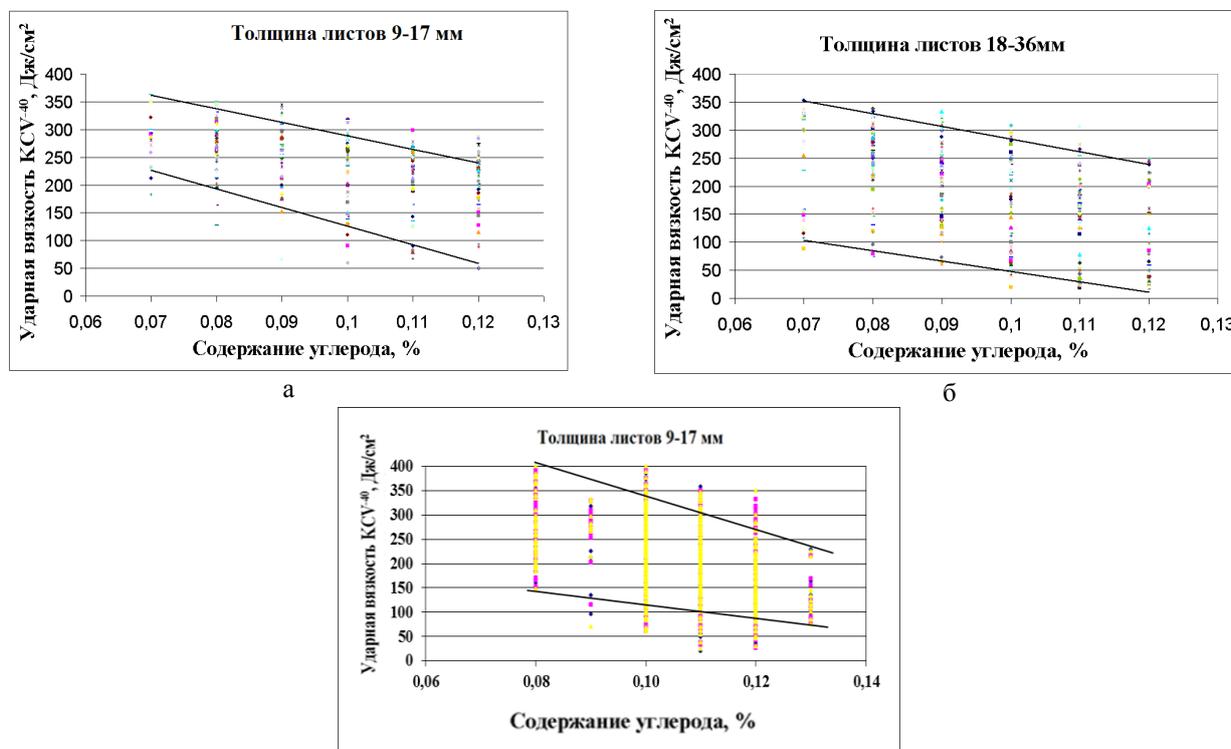


Рис. 2. Значения ударной вязкости KCV^{40} в зависимости от содержания углерода:
 а – листов стали марки 13ХФА толщиной 9–17 мм; б – листов стали марки 13ХФА толщиной 18–36 мм;
 в – листов стали марки 09ГСФ толщиной 9–17 мм

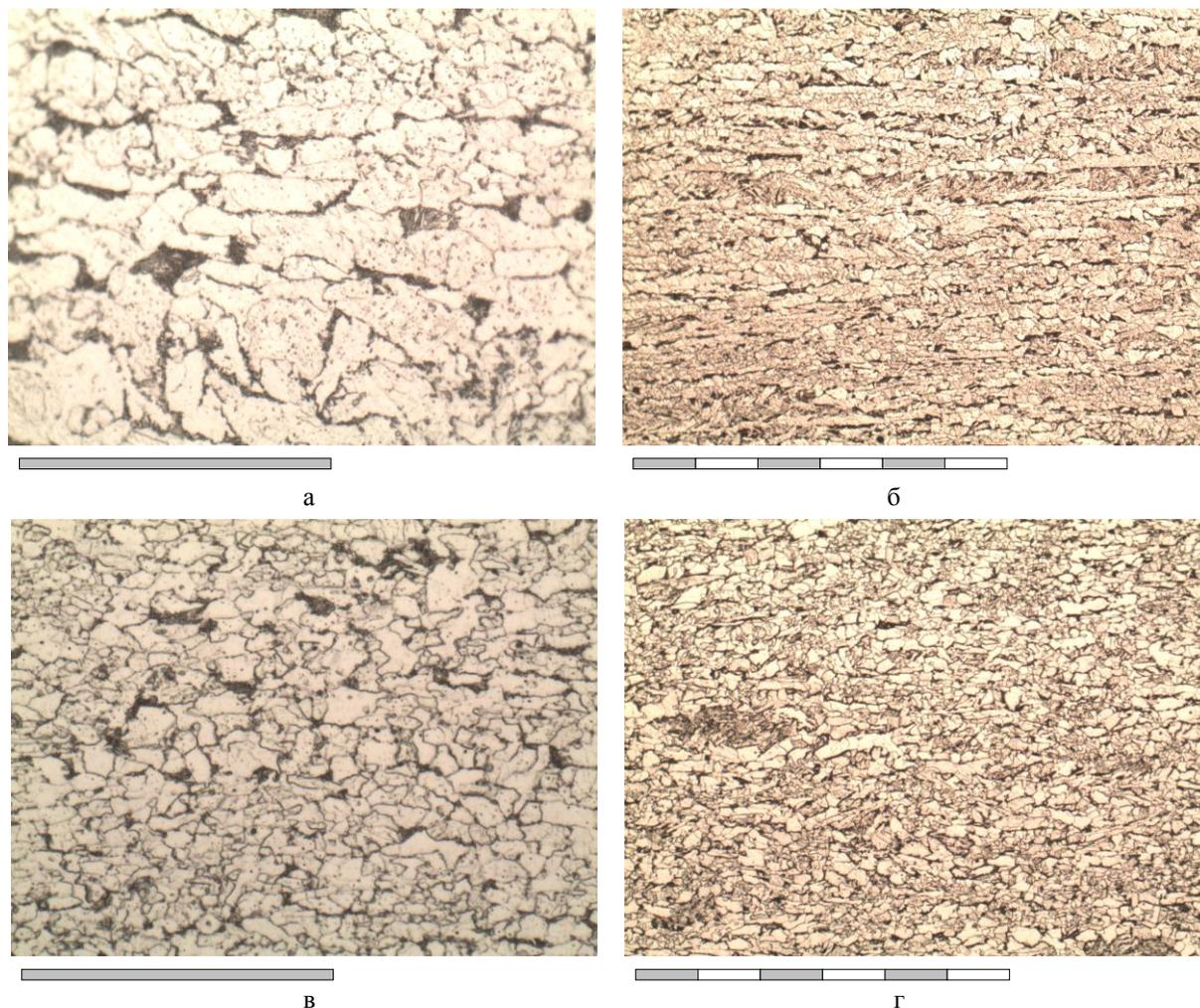


Рис. 3. Микроструктура листов:

а – поверхность $\times 500$, лист 17 мм 13ХФА; б – поверхность $\times 100$, лист 17 мм 13ХФА;
 в – поверхность $\times 500$, лист 15 мм 09ГСФ; г – поверхность $\times 100$, лист 15 мм 09ГСФ;

Проведенные в НПАО НПО «ВНИИТнефть» и ООО «НИПП «Вальма» исследования коррозионной стойкости проката, произведенного по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением и последующим высоким отпуском, показали, что листовая прокат полностью соответствует установленным требованиям нормативной документации в части сопротивления коррозионному сероводородному растрескиванию под напряжением и водородному растрескиванию:

- коэффициент длины трещины CLR не превышает 6%;
- коэффициент длины трещины в сечениях одного образца CLR не превышает 15%;
- коэффициент толщины трещины CTR не превышает 3%;
- СКРН по NACE TM 0177 Метод А $\sigma_{th} = 0,72\sigma_T$;
- скорость общей коррозии по методике НефтеГазСервис №9668-006-593377520-2003, не превышает 0,5 мм/год.

Заключение

В условиях АО «Уральская Сталь» успешно внедрена унифицированная комплексная технология производства коррозионностойкого листового проката из стали марок 09ГСФ, 13ХФА в широком диапазоне размерного сортамента с обеспечением требований к водородному растрескиванию по NACE TM0284 и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по методу «А» стандарта NACE TM0177.

Разработанные режимы контролируемой прокатки, включающие ускоренное последеформационное охлаждение с проведением последующего «высокого отпуска» с контролем температуры металла на выходе из печи, обеспечивают заданный уровень механических характеристик, соответствующих классу прочности K52.

Для обеспечения удовлетворительной плоскостности листов целесообразно применение двух вариан-

тов химического состава в зависимости от толщины готового листа.

Режимы производства обеспечивают высокую хладостойкость металла, фактические значения ударной вязкости KCV⁻⁴⁰ значительно превышают нормативные требования.

Снижение соотношения Ca/S в металле до ~ 0,6-1,0 при содержании серы менее 0,002% не только не приводит к снижению коррозионной стойкости, но и минимизирует ликвационную неоднородность стали и загрязненность неметаллическими включениями.

АО «Уральская Сталь» имеет возможность промышленного производства коррозионно-стойкого листового проката из стали марок 09ГСФ, 13ХФА в широком размерном диапазоне.

Список литературы

1. Nakasugi H., Matsuda H. Development of new line-pipe steels for sour-gas service. Nippon steel Techn. Rep. 1979, №14, pp. 66-78.
2. Treseder R., Swanson T. Factors in sulfide corrosion cracking of high strength steels. Corrosion, 1968, v. 24, №2, pp.31-37.
3. Townsend H. Hydrogen sulfide stress corrosion cracking of high strength steels wire. Corrosion, 1972, v. 28, №2, pp.39-46.
4. Li.J., Oriani R., Darken L. The thermodynamic of stressed solids. Zeitschrift fur physic. Chem N.F., 1966, Bd49, № 3-5, pp. 271-290.
5. Влияние режимов деформационно-термической обработки на склонность трубной стали к коррозионному растрескиванию под напряжением / Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов, А.А. Батьков и др. // Металлург. 2007. № 11. С. 27-32.
6. Титова Т.М. О целесообразности позднего микрولةгирования стали в процессе формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ // Металл и литье Украины. №3. 2009. С. 19-22.
7. Разработка технологии производства стали 09ГСФ повышенной коррозионной стойкости / А.А. Сафронов, В.С. Дуб, М.А. Мовчан, А.В. Иоффе, Е.Л. Базаев, А.А. Придеин // Сталь. 2016. № 2.

Сведения об авторах

Бедринов Александр Игоревич – главный инженер АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: a.bedrinov@uralsteel.com.

Куницын Глеб Александрович – технический директор АО «Уральская сталь», доктор технических наук, Новотроицк, Россия. E-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com.

Придеин Андрей Александрович – начальник управления технического сопровождения прокатного производства АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: a.pridein@uralsteel.com.

Прокопенко Леонид Владимирович – начальник прокатного отдела АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: l.prokopenko@uralsteel.com.

Базаев Евгений Леонидович – главный специалист по инновационным видам продукции АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: e.bazaev@uralsteel.com.

Самохина Ольга Викторовна – начальник отдела по термической обработке АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: o.samohina@uralsteel.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SPECIAL ASPECTS OF PRODUCTION OF STRIPS RESISTANT TO HYDROGEN SULFIDE STRESS CRACKING

Bedrinov Alexander I. – Chief Engineer JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: a.bedrinov@uralsteel.com

Kunitsyn Gleb A. – Technical Director; JSC «Ural Steel», Doctor of Technical Sciences, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com.

Pridein Andrey A. – Head of Dpt. Technical support of rolling Production, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: a.pridein@uralsteel.com.

Prokopenko Leonid V. – Head of Rolling Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: l.prokopenko@uralsteel.com

Bazaev Evgeniy L. – Chief Spec. in Innovative Products, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: e.bazaev@uralsteel.com.

Samohina Olga V. – Head of Thermal Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: o.samohina@uralsteel.com.

Abstract. For the construction of field oil pipelines, pipes made of 09ГЦФ and 13ХФА steels corresponding to the strength class K52, are most in demand. Increased requirements are imposed on the resistance to the effect of aggressive media containing water and hydrogen sulfide of pipe products and fittings of field oil and oil product pipelines. JSC Ural Steel has successfully implemented a unified integrated process for the production of corrosion-resistant plates made of 09ГЦФ and 13ХФА steel grades with a wide range of sizes, meeting the requirements for hydrogen-induced cracking according to the NACE TM0284 standard and sulfide stress corrosion cracking according to method A of NACE TM0177 standard. Controlled rolling patterns with accelerated post-deformation cooling and subsequent high tempering have been developed, which provide a specified level of mechanical characteristics corresponding to the strength class K52. To ensure satisfactory flatness of plates, variants of chemical composition of steel are recommended depending on the thickness of the finished plate. Production modes provide high cold resistance of steel and actual values of impact toughness KCV^{40} that significantly exceed regulatory requirements. It is shown that a decrease in the Ca/S ratio in steel down to ~ 0.6–1.0 with a sulfur content of less than 0.002% does not only lead to a decrease in corrosion resistance, but also minimizes the segregation inhomogeneity of the steel and contamination with non-metallic inclusions. The process developed at JSC Ural Steel provides the possibility of industrial production of corrosion-resistant plates made of 09ГЦФ and 13ХФА steel grades with a wide size range.

Key words: secondary metallurgy, corrosion resistance, hydrogen-induced cracking, hydrogen sulfide cracking, controlled rolling, accelerated cooling, high tempering, microstructure.

Ссылка на статью:

Особенности производства штрипса, стойкого к сероводородному растрескиванию под напряжением / А.И. Бедринов, Г.А. Куницын, А.А. Придеин, Л.В. Прокопенко, Е.Л. Базаев, О.В. Самохина // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 24-31.
Bedrinov A.I., Kunitsyn G.A., Pridein A.A., Prokopenko L.V., Bazaev E.L., Samohina O.V. Special aspects of production of strips resistant to hydrogen sulfide stress cracking. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 24-31.

УДК 621.771.09

Бедринов А.И., Куницын Г.А., Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Рой В.М.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ШТРИПСА ПОВЫШЕННОЙ ХЛАДОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ОБУСТРОЙСТВА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗАВОДА ПО ПРОИЗВОДСТВУ СЖИЖЕННОГО ГАЗА ОАО «ЯМАЛ-СПГ»

Аннотация. В рамках совершенствования штрипса из стали марок К42-К60 для электросварных труб диаметром 530-1220 мм, производимого на АО «Уральская Сталь», в 2005 году ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» были разработаны и согласованы с заинтересованными организациями ТУ 14-1-5511 «Прокат толстолистовой для электросварных труб класса прочности К42-К60 диаметром 530-1220 мм». Указанный прокат был успешно использован в проектах для изготовления трубопроводов «Восточная Сибирь – Тихий океан», «Бованенково-Ухта», Сахалин-Хабаровск – Владивосток и мн. др. Учитывая богатый опыт АО «Уральская Сталь» при производстве штрипса для трубопроводов по национальным проектам, АО «Уральская Сталь» было выбрано основным поставщиком штрипса класса прочности Х70(К60) для изготовления труб, предназначенных для обустройства газосборных систем завода по производству сжиженного газа ОАО «Ямал-СПГ», в рамках освоения Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения на полуострове Ямал. При разработке стали было предусмотрено ужесточение требований по ряду технических характеристик, направленное на повышение надежности штрипса и повышения его эксплуатационных характеристик. Совершенствование коснулось в части повышения хладостойкости стали, повышения требований по ударной вязкости на образцах Шарпи при отрицательных температурах до -60°C , чистоты стали по неметаллическим включениям, по увеличению нормативных требований по пределу текучести, расширение размерного сортамента в части поставки штрипса толщиной 25-28,5 мм. Рассматриваемый металлопрокат – штрипс класса прочности Х70(К60), произведенный на стане 2800 АО «Уральская Сталь», обеспечивал не только более высокие качественные характеристики труб, но и имел более привлекательные цены в сравнении со штрипсом, произведенном на стане 5000 других металлургических предприятий. АО «Уральская Сталь» – единственное металлургическое предприятие России, обеспечивающее производство на стане 2800 штрипса класса прочности Х70(К60) толщиной более 20 мм. Освоенный в промышленном производстве на АО «Уральская Сталь» штрипс из стали класса прочности Х70(К60) улучшенной хладостойкостью и свариваемостью был предложен широкому кругу потребителей – трубным заводам и заводам по производству фитингов, деталей трубопроводов. Штрипс класса прочности Х70(К60) позволяет изготавливать трубы и эксплуатировать трубопроводы с высокими эксплуатационными характеристиками в районах крайнего Севера.

Ключевые слова: термомеханическая прокатка, микроструктура, ускоренное охлаждение, микролегирование.

Введение

В настоящее время практически все современные толстолистовые станы, занятые в производстве штрипсов, оборудованы устройствами для интенсивного охлаждения раскатов, позволяющими реализовать технологию термомеханической прокатки с последовательным ускоренным охлаждением. Практически такая технология применяется для штрипсов толщиной 14 мм и более. Применение ускоренного охлаждения позволяет одновременно повысить прочностные свойства и хладостойкость проката за счет получения более дисперсной структуры и замены перлита в углеродсодержащей фазе на продукты промежуточного превращения в стали. Это обстоятельство позволяет либо поднять класс прочности штрипса при аналогичном уровне легирования, либо снизить общее легирование стали для одного и того же класса прочности.

Наиболее распространенной композицией химического состава, применяемой для сталей класса прочности Х70 (К60) в толщинах до 20 мм, является система легирования С-Si-Mn-Nb-V, т.е. стали типа 10Г2ФБ. Использование ускоренного охлаждения позволяет снизить максимальное содержание углерода,

марганца и кремния в стали указанного класса прочности. С увеличением толщины 20 мм и более, как правило, удается снизить содержание углерода с 0,10–0,12 до 0,06–0,08 %.

Как известно, при производстве листового проката класса прочности Х70 (К60) с использованием термомеханической прокатки необходимым условием является использование микролегирующих добавок Nb, V, Ti [1–3], позволяющих эффективно управлять процессами формирования зеренной структуры (контроль роста аустенитного зерна при нагреве, рекристаллизации аустенита), а также выделением мелкодисперсных упрочняющих частиц, тем самым формируя требуемый комплекс механических и технологических свойств проката (табл. 1).

В настоящее время приоритетным направлением в АО «Газпром» стало строительство магистральных газопроводов диаметром 1420 мм. Станам 2800 достается «скромное» участие в изготовлении штрипса, предназначенного для изготовления ответвлений, перемычек и отводов.

Тем не менее с целью освоения Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения, возникла необходимость в поставке труб диаметром 530 мм для обустройства газосборных сетей ОАО «Ямал-СПГ», предусматривающая строительство завода по производству сжиженного природного газа (СПГ) мощностью 16,5 млн т в год.

© Бедринов А.И., Куницын Г.А., Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Рой В.М., 2021

Требования по механическим свойствам стали класса прочности X70 (K60)

Класс прочности	Предел текучести σ_T , Н/мм ²	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Отношение σ_T/σ_B	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость KCV ⁻⁵⁰ / KCV ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	Доля волокна при ИПГ (-20°C), %
			не более	не менее		
X70 (K60)	505–605	590–710	0,90	22,0	58,8	70

Результаты исследование и производства

В рамках заказов ПАО «ЧТПЗ» и АО «ЗТЗ» АО «Уральская Сталь» осуществляла поставку стали класса прочности X70 (K60) трех профилей штрипса 25×1577 мм, 28×1568 мм, 28,5×1566 мм общим объемом 6000 т. Фактически данный заказ был первым участием АО «Уральская Сталь» в масштабных проектах по строительству трубопроводов с толщиной стенки свыше 20 мм.

Особенностью данного проекта была поставка «относительно» толстых профилей для стана 2800 – 25–28,5 мм класса прочности X70 (K60) с требованиями по ультразвуковому контролю листов по критериям, превышающим требования 0 класса сплошности ГОСТ 27772 в десять раз.

Такие высокие требования потребовали разработки комплексной технологии производства стали класса прочности X70 (K60):

1. В качестве базового химического состава выбран классический химический состав стали класса прочности X70 (K60), предусматривающий микролегирование Nb, V, Ti (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав стали класса прочности X70 (K60) массовая доля, %

Сталь класса прочности	C	Si	Mn	Nb	V	Ti	S	P	N
X70 (K60)	0,07-0,09	0,25-0,35	1,50-1,70	0,05-0,06	0,05-0,06	0,015-0,030	0,002	0,010	0,008

2. Использование чугуна при шихтовке значительно снижает содержание в готовой стали цветных примесей: олова, свинца, сурьмы, цинка и др. В связи с чем при выплавке в электропечах, содержание чугуна в шихтовке стали составляло 80%.

3. При непрерывной разливке стали на МНЛЗ на первой плавке в серии происходит набор скорости от 0 до рабочей, на последней плавке в серии, наоборот, происходит снижение скорости разливки от рабочей до 0. Процесс разгона и торможения при непрерывной разливке ухудшает условия кристаллизации металла и приводит к переохлаждению поверхности непрерыв-

нолитой заготовки. Для обеспечения заданных требований по УЗК при планировании разливки стали класса прочности X70 (K60) первая и последняя плавки в серии назначались на другие заказы со схожим химическим составом и более мягкими требованиями по УЗК.

Максимальное использование чугуна при шихтовке стали и исключение первой и последней плавки при непрерывной разливке в сочетании с замедленным охлаждением листов в стопах позволили обеспечить установленные требования по УЗК, отсортировка по данному дефекту на объеме 6000 т составила 2 листа.

4. Другой характерной особенностью разработанной технологии было применение «относительно» высокой температуры нагрева слэбов под прокатку 1200–1220°C. Данный режим позволил провести прокатку в черновой клети при температуре 1050–1120°C с обеспечением относительных обжатий до 15–18%. Такие обжатия позволили формировать более мелкое и равноосное аустенитное зерно после черновой стадии прокатки благодаря протеканию рекристаллизации после каждого прохода на клети ДУО и в конечном результате повысить как прочностные, так и пластические свойства.

5. Чистовую стадию прокатки осуществляли в интервале температур 790–820°C. Суммарная деформация на чистовой стадии прокатки составила более 75%, частные обжатия за проход составляли 12–18%.

6. Подстуживание раската на межклетьевом пространстве составляло 9–10 минут, что отрицательно сказывается на производительности стана. С целью обеспечения производительности стана на уровне 110–120 т/ч и исключения «пересиживания» слэбов в методических печах применена технология «отдельного» посада. Одновременно в разные печи высаживался металл класса прочности X70 (K60) по технологии термомеханической прокатки и металл, прокатываемый без регламентации температуры окончания прокатки.

7. Использование ускоренного охлаждения сразу после окончания пластической деформации обеспечивает получение мелкозернистой структуры. Увеличение интенсивности охлаждения позволяет получить мелкодисперсную ферритобейнитную микроструктуру и обеспечит высокую прочность и хладостойкость штрипса.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листов толщиной 25–28,5 мм класса прочности X70 (K60) приведен на рис. 1.

Значения хладостойких характеристик в зависимости от температуры окончания прокатки приведены на рис. 2.

Требование нормативного документа предусматривало значение доли волокна в изломе образцов ИПГ при температуре минус 20°C не менее 70%. На одном образце допускалось снижение доли волокна на 10%, при этом среднеарифметическое значение должно

быть не менее 70%. С учетом допустимого снижения по результатам исполнения всего заказа 4 листа имели заниженное значение доли вязкой составляющей.

Характерный вид изломов образцов при испытании падающим грузом представлен на рис. 3.

Термомеханическая прокатка в сочетании с ускоренным охлаждением обеспечивает получение однородной мелкодисперсной ферритобейнитной структуры (рис. 4). Соотношение структурных составляющих: бейнит – 15%, феррит – 80%, перлит – 5%.

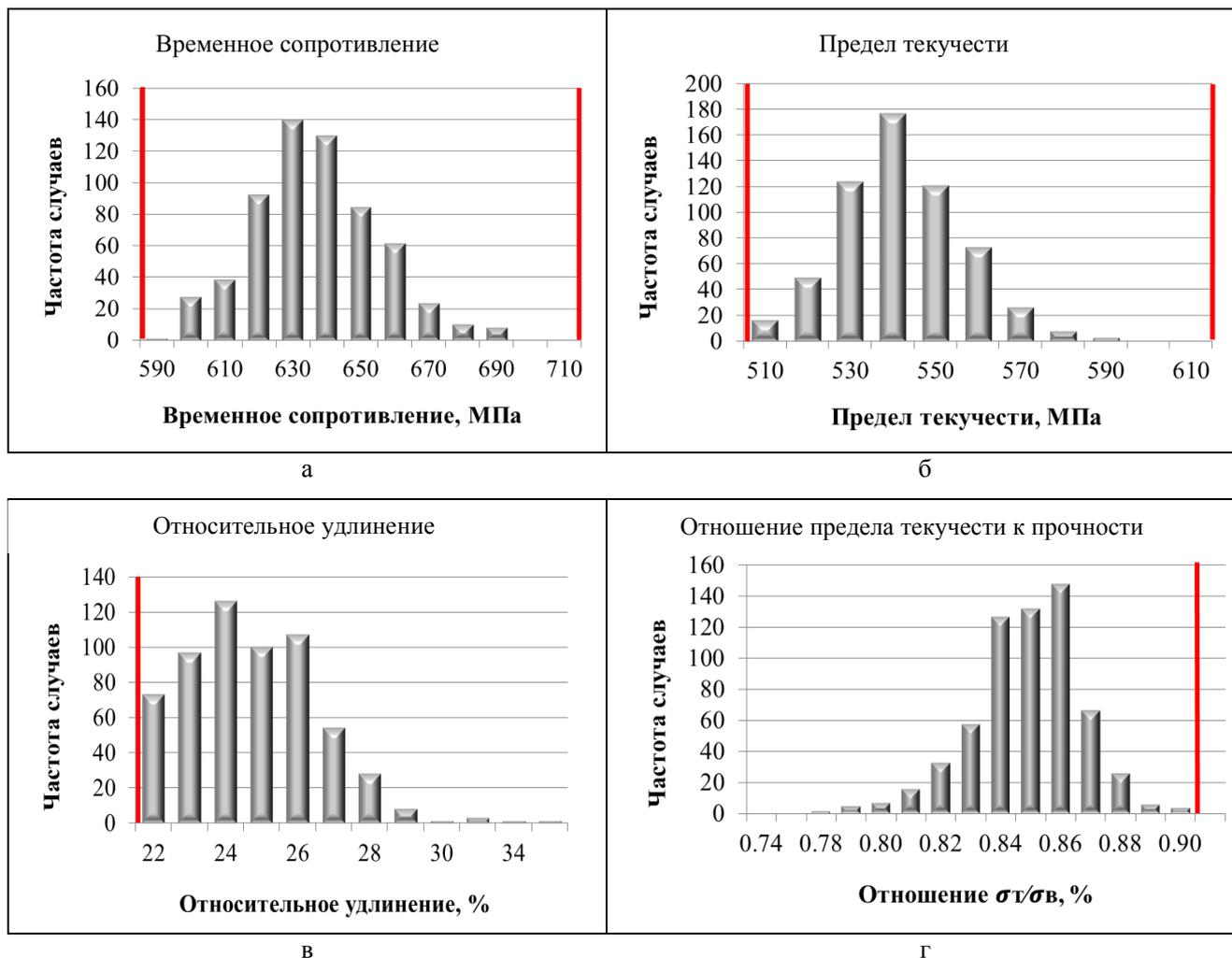


Рис 1. Уровень механических свойств листов K60 (X70) толщиной 25–28,5 мм:

- а – частотное распределение временного сопротивления;
- б – частотное распределение предела текучести;
- в – частотное распределение относительного удлинения;
- г – частота распределения отношения предела текучести к временному сопротивлению

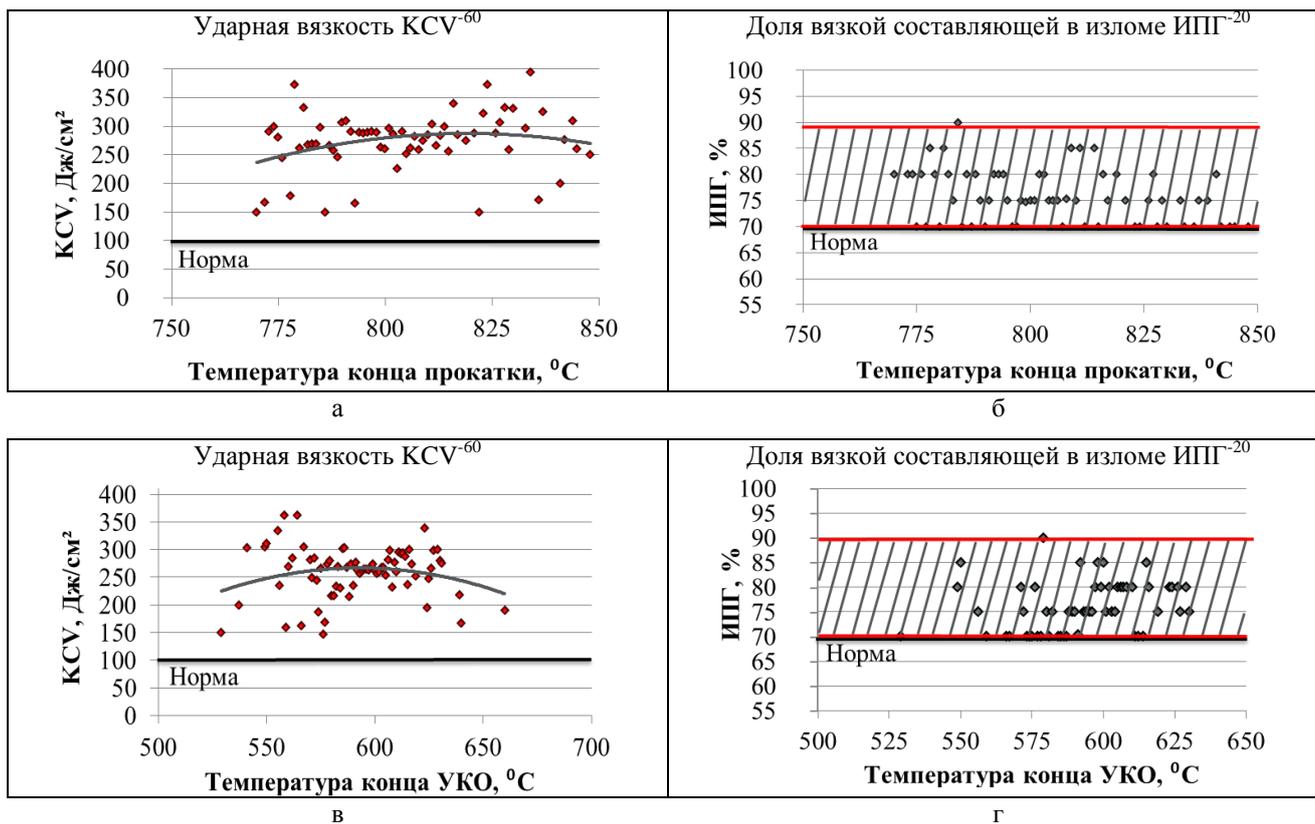


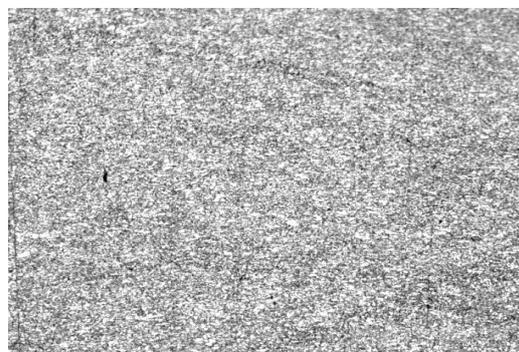
Рис. 2. Зависимость KCV^{-60} и IIP^{-20} листов толщиной 25–28,5 мм от температуры конца прокатки и температуры ускоренного охлаждения в УКО:
 а – зависимость KCV^{-60} от температуры конца прокатки;
 б – зависимость IIP^{-20} от температуры конца прокатки;
 в – зависимость KCV^{-60} от температуры ускоренного охлаждения в УКО;
 г – зависимость IIP^{-20} от температуры конца прокатки



Рис. 3. Вид изломов образцов толщиной 25 мм при испытании падающим грузом



Поверхность, $\times 500$



Поверхность, $\times 100$

Рис. 4. Микроструктура листов толщиной 25 мм

Заключение

В условиях АО «Уральская Сталь» успешно внедрена комплексная технология производства листового проката толщиной 25–28,5 мм из стали класса прочности Х70 (К60) с требованиями по ультразвуковому контролю листов по критериям, превышающим требования 0 класса сплошности ГОСТ 27772 в десять раз. Требуемый уровень прочностных характеристик в сочетании с высокой хладостойкостью проката KCV⁻⁵⁰, KCV⁻⁶⁰, ИПГ⁻²⁰ обеспечивается путем формирования мелкозернистой ферритобейнитной структуры при термомеханической обработке.

Разработаны и внедрены высокоэффективные режимы ускоренного охлаждения штрипсов толщиной более 20 мм.

Проведенный комплекс работ подтвердил перспективное развитие стана 2800 в направлении листового проката из высокопрочных марок, предназначенных для электросварных труб толщиной до 34 мм и фитингов толщиной до 50 мм.

Сведения об авторах

Бедринов Александр Игоревич – главный инженер АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: info@uralsteel.com.

Куницын Глеб Александрович – технический директор АО «Уральская сталь», доктор технических наук, Новотроицк, Россия. E-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com.

Придеин Андрей Александрович – начальник управления технического сопровождения прокатного производства АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: a.pridein@uralsteel.com.

Прокопенко Леонид Владимирович – начальник прокатного отдела АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: l.prokopenko@uralsteel.com.

Базаев Евгений Леонидович – главный специалист прокатного отдела АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: e.bazaev@uralsteel.com.

Рой Вадим Михайлович – главный специалист прокатного отдела АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: v.roy@uralsteel.com.

Коллектив АО «Уральская Сталь» удостоен золотой медали международной выставки «Металл ЭКСПО» за разработку и промышленное освоение технологии производства штрипса и труб для обустройства газосборных сетей завода ОАО «Ямал-СПГ».

Список литературы

1. Матросов Ю.И. Механизм влияния микродобавок ванадия, ниобия и титана на структуру и свойства малоперлитных сталей // МиТОМ. 1984. №11.
2. Ниобийсодержащие низколегированные стали / Ф. Хайстеркамп, К. Хулка, Ю.И. Матросов, Ю.Д. Морозов, Л.И. Эфрон, В.И. Столяров, О.Н. Чевская. М.: ООО «СП Интернет Инжиниринг», 1999. 94 с.
3. Матросов Ю.И. Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных трубопроводов. М.: Металлургиздат, 1989.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SPECIAL ASPECTS OF PRODUCTION OF STRIPS WITH LOW TEMPERATURE PROPERTIES FOR THE ARRANGEMENT OF GAS DISTRIBUTION SYSTEMS FOR THE LIQUEFIED GAS PRODUCTION PLANT JSC YAMAL-LNG

Bedrinov Alexander I. – Chief Engineer JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: info@uralsteel.com.

Kunitsyn Gleb A. – Technical Director, JSC «Ural Steel», Doctor of Technical Sciences, Novotroitsk, Russia. E-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com.

Pridein Andrey A. – Head of Dpt. Technical support of rolling Production, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: a.pridein@uralsteel.com.

Prokopenko Leonid V. – Head of Rolling Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: l.prokopenko@uralsteel.com

Bazaev Evgeniy L. – Chief Spec. of Rolling Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: e.bazaev@uralsteel.com.

Roi Vadim M. – Chief Specialist of Rolling Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: v.roy@uralsteel.com.

Annotation. In 2005 I. P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy SSC FGUP developed and approved together with interested parties TY 14-1-5511 Technical Specifications “Rolled plates for 530-1,220 mm electric-welded pipes of K42-K60 strength grade” as part of improving K42-K60 strip for 530-1,220 mm electric-welded pipes performed in Ural Steel JSC. The above rolled products were successfully applied in projects on manufacturing of the Eastern Siberia – Pacific Ocean, Bovanenkovo-Ukhta, Sakhalin–Khabarovsk–Vladivostok pipelines and many others. Taking into consideration the vast experience of Ural Steel JSC in strip production for pipelines under national projects it was selected as the key supplier of X70(K60) strip for manufacturing pipelines designed for arrangement of gas-gathering systems in Yamal LNG gas plant within development of South-Tambey gas condensate field located on the Yamal Peninsula. When developing steel it was envisaged to impose stricter requirements on a number of technical characteristics for the purpose of increasing strip reliability and enhancing its performance. The enhancement captured non-metallic inclusion purity degree in terms of steel cold resistance improvement and raised impact strength requirements on Charpy specimen at negative temperatures down to -60 °C and extension of the grade mix for supplied 25-28.5 mm thick strips due to severization of regulatory requirements to yield strength. The rolled steel under study, i.e. X70(K60) strips produced in 2800 Mill at Ural Steel JSC, both ensured much better quality characteristics in pipelines and had more attractive prices compared to strips produced in 5000 Mill at other steelmaking plants. Ural Steel JSC is the only steelmaking plant in Russia which can produce X70(K60) strip with a thickness of over 20 mm in 2800 Mill. X70(K60) strips with improved cold resistance and weldability mastered in industrial production of Ural Steel JSC were offered to a wide variety of customers, including pipeline, fitting and components producing plants. X70(K60) strips allow for manufacturing and operating high performance pipelines in the Far North regions.

Key words: corrosion resistance, hydrogen-induced cracking, sulfide stress cracking, controlled rolling, accelerated cooling, high-temperature tempering, microstructure.

Ссылка на статью:

Особенности производства штрипса повышенной хладостойкости для обустройства газораспределительных систем завода по производству сжиженного газа ОАО «Ямал-СПГ» / А.И. Бедринов, Г.А. Куницын, А.А. Придеин, Л.В. Прокопенко, Е.Л. Базаев, В.М. Рой // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 32-37.

Bedrinov A.I., Kunitsyn G.A., Pridein A.A., Prokopenko L.V., Bazaev E.L., Roi V.M. Special aspects of production of strips with low temperature properties for the arrangement of gas distribution systems for the liquefied gas production plant JSC Yamal-LNG. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 32-37.

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА

Аннотация. Слоистые материалы получили распространение в транспортной, химической, нефтяной отраслях производства. Сортамент производимой продукции широк: от лент и листов до профилей специального назначения. Необходимо разрабатывать технологии обработки слоистых материалов, позволяющие получить высокий уровень механических свойств. В связи с этим рассмотрен процесс асимметричного деформирования алюминиевых слоистых листовых композитов. Проводился анализ закономерностей процесса прокатки алюминиевых сплавов для определения рациональных параметров, которые обеспечат прямолинейность выхода металла из очага деформации и требуемую градиентную структуру каждого из составляющих его слоев. Анализ проводился на основе моделирования экспериментов в программном комплексе *Deform 2D*. Результаты показывают, что требуемый уровень градиента деформации может быть достигнут во всех слоях слоистого листового композита благодаря верно подобранным параметрам прокатки. Предварительная проверка результатов моделирования осуществлялась на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Были использованы образцы алюминиевых сплавов пятой и шестой серий, подготовленные к обработке по установленной технологии. Показаны преимущества асимметричного деформирования перед симметричным. Приведены результаты испытаний на твердость методом Бринелля.

Ключевые слова: асимметричное деформирование, алюминиевый сплав, эквивалентная деформация, интенсивность деформации, компьютерное моделирование, интенсивная пластическая деформация.

Введение

Слоистые металлы на сегодняшний день являются альтернативной заменой легированным монометаллам. Такого рода сплавы широко применяются в различных отраслях: от космической техники до химической промышленности. Они обладают особыми физико-механическими свойствами, так как сочетают в себе параметры двух и более составляющих. Высокая коррозионная стойкость, соизмеримые прочность и пластичность, технологичность позволят слоистым материалам выдерживать не только высокие нагрузки, но и условия использования в агрессивных средах без значительного изменения прочностных характеристик. Методы получения слоистых материалов разнообразны: сваркой, литьем, наплавкой и пластической деформацией [1,2]. Последний способ наиболее распространен при обработке металлов давлением, например при штамповке, ковке или прокатке. Однако существуют трудности в подготовке поверхности металлов для прочного соединения и образования переходных слоев или диффузионных прослоек. Сложность получения прочного переходного слоя зависит от видов соединяемых металлов, их способности образовывать защитные оксидные пленки, возможности удаления пленок, защиты поверхности от их образования и разрушения при пластической деформации. Процессы соединения также могут сопровождаться образованием интерметаллидов, что неблагоприятно влияет на свойства [3].

В связи с этим одним из наиболее подходящих материалов для производства слоистых композитов является алюминий и его сплавы. При сварке двух видов алюминиевых сплавов давлением важно верно

подобрать способ очистки поверхности от внешних загрязнений и оксидных пленок, а также значение обжатий и температурную обработку.

Предлагаемые алюминиевые листовые слоистые композиты могут найти свое применение в автомобиле-, авиа- и ракетостроении. В данном случае остро стоят вопросы экологического характера – необходимо создавать такие конструкции, которые позволят снизить массу готового изделия, что, с одной стороны, сократит потребление топлива в перечисленных отраслях, а с другой – уменьшит выбросы вредных веществ в атмосферу. Очевидно, что алюминий в качестве конструкционного материала будет соответствовать требованиям по легковесности, при этом верно подобранная обработка позволит получить высокий уровень прочностных и пластических характеристик. Таким видом обработки выступают методы интенсивной пластической деформации в виде асимметричного деформирования, что может включать в себя асимметричную прокатку, асимметричную аккумуляющую прокатку и асимметричную криогенную прокатку, схемы которых представлены на рисунке 1 [4-13]. Цель данных методов – получить нано- или ультрамелкозернистую градиентную структуру. Свойства металла после такой обработки показывают увеличение прочности, износостойкости в сочетании с сохранением или даже увеличением значения пластичности. Более того появляется возможность обрабатывать длинномерные изделия, что было достаточно затруднительно при других методах ИПД, например при равноканальном угловом прессовании или при всесторонней изотермической ковке [14-23].

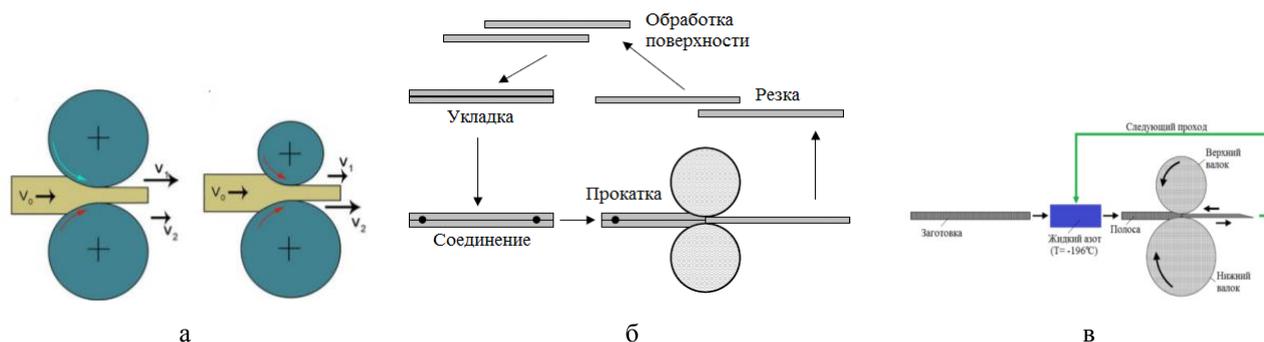


Рисунок 1 – Виды асимметричного деформирования:
 а – асимметричная прокатка; б – асимметричная аккумуляционная прокатка;
 в – асимметричная криогенная прокатка) [4]

Таблица 1

Химический состав алюминиевых сплавов 2024, 5083 и 6061

Сплав	Mg	Cu	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Cr	Al
2024	0,473	0,02	0,422	0,178	0,25	0,019	0,15	0,001	98,487
5083	4,479	0,027	0,091	0,285	0,014	0,682	0,007	0,104	94,282
6061	1,00	0,275	0,60	0,70	0,25	0,15	0,15	0,05	97,097

Однако методы асимметричного деформирования имеют некоторые ограничения. Большая сдвиговая деформация может приводить к высокой неоднородности полосы, которая может приводить к образованию дефектов – рванин, трещин и пор, а в слоистом материале дополнительно могут появиться расслоения по сварному шву. Для решения указанных проблем необходимо подбирать технологические режимы, согласно которым коэффициенты трения, рассогласования скоростей валков, предварительная термическая обработка (нагрев или, наоборот, скоростное охлаждение) будут соответствовать бездефектной обработке и прямолинейному выходу металла из очага деформации с учетом асимметрии.

Методы исследования и используемые материалы

Целью данной работы является анализ закономерностей асимметричного деформирования алюминиевых сплавов для определения рациональных параметров, которые, с одной стороны, позволят обеспечить прямолинейность выхода металла из очага деформации, а с другой – требуемую градиентную структуру каждого из составляющих его слоев. При интенсивной пластической деформации (в данном случае при асимметричной прокатке листового слоистого материала и асимметричной аккумуляционной прокатке) необходимо соблюдать условия преобразования структуры, которые включают в себя достижение значений эквивалентной деформации (интенсивности) выше 3 [4], что позволит получить высокого значения прочность и пластичность. Происходит это благодаря образованию углов сдвига и поворота, которые дают увеличение сдвиговой деформации с образованием схемы совмещения простого и чистого сдвига, и получение мелкозернистой структуры (на уровне ультрамелкозернистой и нано).

Анализ проводился с помощью моделирования процесса в программном комплексе Deform 2D. Показано исследование на примере асимметричного деформирования алюминиевых сплавов 2024 (аналог Д16), 5083 (АМг4,5) и 6061 (АД33), химический состав которых представлен в табл. 1.

Для оценки деформированного состояния, условий изменения эквивалентной деформации в программном комплексе Deform 2D моделировался процесс симметричной и асимметричной прокатки слоистого листового композита и асимметричной аккумуляционной прокатки. В качестве исходного материала использовался слоистый листовый композит из алюминиевого сплава 5083/2024 и 6061/2024 с толщиной 2 мм, как показано на рис. 2. Прокатка велась без натяжения. Диаметр абсолютно жестких валков составлял 250 мм, коэффициент трения варьировался от 0,1 до 0,4. Степень деформации была принята 50%. Скорость валков при симметричной прокатке составляла 1,047 рад/с. Отношение скоростей валков при асимметричном деформировании изменялось в пределах 10% – 50%. Условия соединения двух слоев разнородных алюминиевых сплавов было задано как «склеивание», подразумевающее их механическую сварку во время деформирования.

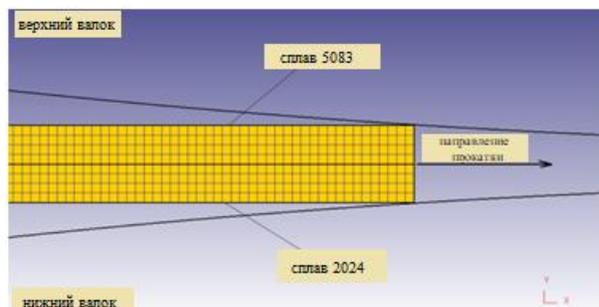


Рис. 2. Вид заготовки при компьютерном моделировании асимметричного деформирования алюминиевого слоистого композита 5083/2024

Предыдущие эксперименты показали, что при изменении скорости валков при создании асимметрии от 10 до 50 % материал может иметь отклонения по прямолинейности при выходе из очага деформации [24,25]. В большинстве моделей присутствует отклонение по прямолинейности, который вызывает изгиб как переднего, так и заднего концов полосы. Факторы, наиболее влияющие на изгиб металла: коэффициент трения, значение рассогласования скоростей валков, вид обрабатываемого материала. Разность скоростей валков варьировалась в зависимости от состава слоистого композита: марка 2024 использовалась в качестве нижнего слоя композита, а 5083 – верхнего. Чем прочнее марка нижнего слоя, тем большая разность скоростей требуется для прямолинейного выхода полосы [26-29].

Результаты исследования

Значения интенсивности деформации в слоистом листовом композите анализировались отдельно по каждому из составляющих его металлов, а также в среднем (промежуточном) слое. Расчет параметров промежуточного слоя проводился путем анализа средних точек соприкосновения двух сплавов. Свойства этого слоя весьма отличаются от сплавов, из которых он состоит. Чтобы получить оптимальную обработку соединения металлов, необходимо учитывать особенности обоих сплавов и исключать возможность образования дефектов в промежуточном слое. Основным недостатком промежуточного слоя в алюминиевых сплавах является практическая невозможность получения одинаковых значений пластичности и прочности по сравнению с основными металлами.

Компьютерное моделирование процесса асимметричного деформирования алюминиевого слоистого композита 5083/2024 при изменении отношения разницы скоростей валков от 10 до 50% имеет следующие результаты (расчеты проанализированы для наиболее подходящих экспериментов с показателем коэффициента трения 0,3 [24-26]): зависимость интенсивности деформации от вида обрабатываемого сплава в слоистом композите показывает, что промежуточный слой деформируется меньше, чем алюминиевые сплавы 2024 и 5083 в случае рассогласования скоростей валков 10 %, 20 % и 50 %. При значениях в 30 % и 40 % наблюдается повышение интенсивности деформации в среднем слое по сравнению с более прочным сплавом 5083. Этот вывод можно сделать на основе показателей интенсивности деформации, представленных на рисунках 3 и 4. Для наглядности при построении графиков не учитывались разнотолщинность слоев в композите и размер среднего слоя. Интенсивность деформации оценивалась по точкам деформированной сетки, находящимся в одной плоскости.

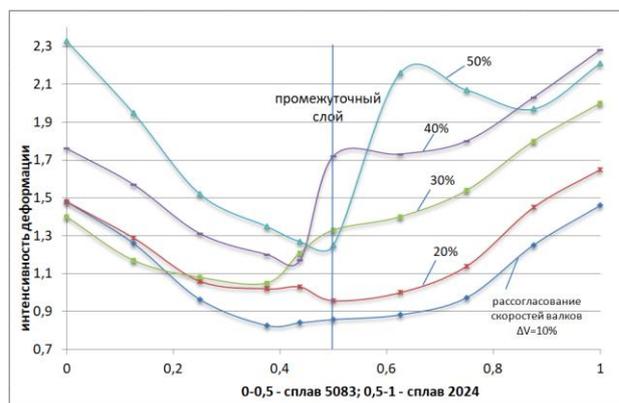


Рис. 3. Зависимость значений интенсивности деформации от вида сплава при асимметричном деформировании слоистого композита 5083/2024

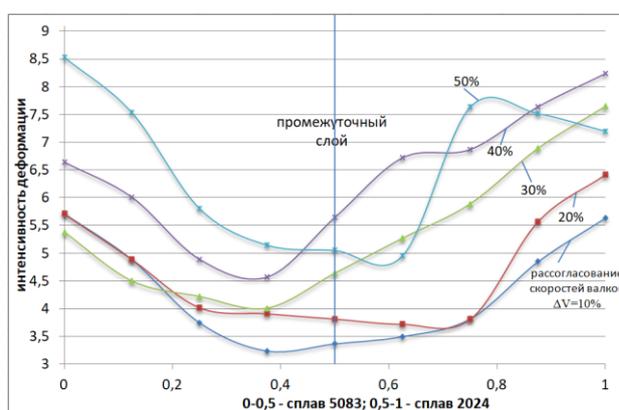


Рис. 4. Зависимость значений интенсивности деформации от вида сплава во втором цикле обработки слоистого композита 5083/2024 методом асимметричного деформирования

Стоит отметить, что рис. 3 характеризует процесс после первого цикла обработки способом асимметричной аккумуляющей прокатки или просто процесс асимметричной прокатки слоистого листового композита. Максимальное значение интенсивности деформации после обработки сплава 5083 составило 2,3; 2,2 – после обработки сплава 2024, что не позволяет получить ультрамелкозернистую структуру (на примере кривой при рассогласовании скоростей валков в 50%), промежуточный слой характеризуется относительно низкими показателями 1,2 и для получения необходимой структуры данного значения также недостаточно. Следовательно, достижение цели возможно двумя путями: проведение второго прохода с изменением конечной толщины до 0,5 мм или использование технологии асимметричной аккумуляющей прокатки с проведением 2-го цикла обработки слоистого композита (что и было выбрано для работы).

График, представленный на рис. 4, значения для которого взяты после второго цикла обработки металла, демонстрирует высокие показания интенсивности деформации, начиная с малых значений отношения скоростей валков. Для простоты сравнения с результатами 1-го цикла обработки оценивались два внутренних слоя всего слоистого листового композита. Так, при соотношении скоростей валков в 10% минимальное значение интенсивности деформации составляет 3,2, а при 50% – 4,8. Максимальное значение изменяется от 5,2 для случая с 30% отношением разницы скоростей валков и 8,5 для 50%.

Была произведена оценка отношения рассогласования скоростей валков и среднего значения интенсивности деформации по толщине проката. Показатели деформации промежуточного слоя изменяются монотонно до значений отношения разницы скоростей валков при прокатке в 40%, причем при 50% наблюдается резкое снижение почти до тех же значений, что и при 30%, как показано на рисунке 5. В этом случае значение отношения разницы скоростей валков в 40% увеличивает вероятность получения ультрамелкозернистой структуры как в каждом сплаве в отдельности, так и в промежуточном слое. Необходимо иметь в виду, что для получения УМЗ-структуры недостаточно одного прохода при асимметричном деформировании с обжатием в 50 %.

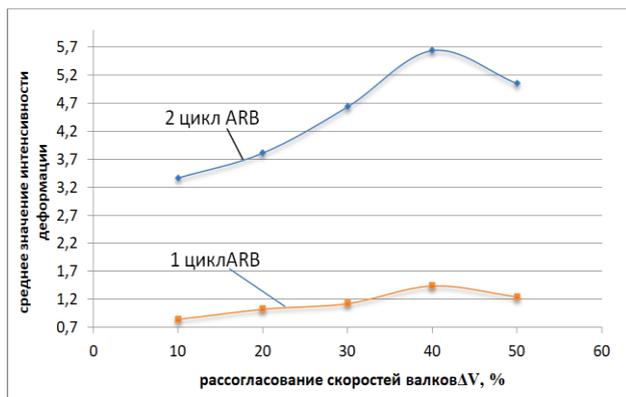


Рис. 5. Зависимость средних значений интенсивности деформации от рассогласования скоростей валков после первого и второго циклов асимметричной аккумулярующей прокатки алюминиевого слоистого листового композита 5083/2024

Исходя из результатов исследования, возможно определить соотношение накопленной деформации и угла сдвига ϕ при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого листового композита 5083/2024. Пороговое значение деформации в совокупности с углом сдвига ϕ , составляющим более 65 градусов, позволяет определить рациональную область реализации процесса асимметричного деформирования в режиме интенсивной пластической деформации, как показано на рисунке 6. При достижении пороговых значений произойдет динамическая рекри-

сталлизация, что позволит фрагментировать слоистый материал на субзерна с учетом промежуточной зоны. Для слоистого композита 6061/2024 результаты аналогичны.

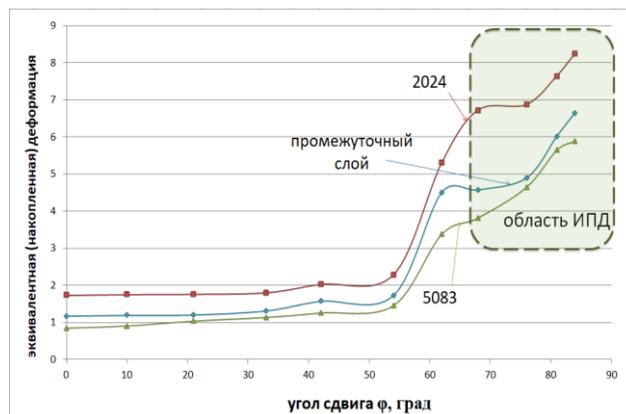


Рис. 6. Взаимосвязь эквивалентной (накопленной) деформации и угла сдвига ϕ при асимметричном деформировании слоистого листового композита 5083/2024

В настоящее время идет экспериментальная проверка полученных результатов на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», который показан на рис. 7. Агрегат представляет собой реверсивный одноклетевой стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН. Диаметр валков составляет 360 мм, а максимальная скорость прокатки 15 м/мин. На данном стане можно обрабатывать как черные (сталь), так и цветные (алюминий, медь, титан) металлы и сплавы.



Рис. 7. Стан 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Предварительно были получены слоистые образцы из алюминиевых сплавов путем симметричного и асимметричного деформирования для подтверждения механизмов протекания процесса и проверки изменения твердости. В данном случае использовались алюминиевые сплавы 5-й и 6-й серий, из которых составлялся слоистый композит. Перед обработкой слоистого материала, поверхность соединения обрабатывалась: производилась зачистка образцов абразивом (шлифовальной бумагой с зернистостью P180), а также обезжиривалась растворителем 646. Образцы до зачистки и после представлены на рис. 8.

Основные параметры прокатки 6-й серии представлены в табл. 2. На рис. 9 проиллюстрированы некоторые результаты экспериментов (образцы 1, 2, 3 и 6).

Основные параметры прокатки 5-й серии представлены в табл. 3. На рис. 10 проиллюстрированы некоторые результаты экспериментов (образцы 7, 8, 11 и 12).



Рис. 8. Образцы алюминиевого сплава 6-й серии до и после подготовки к обработке

Таблица 2

Входные и выходные параметры обработки алюминиевых сплавов 6-й серии на стане 400 асимметричной прокатки

Образец	Номер прохода	Начальная толщина, мм	Усилие прокатки, кН	Установленный зазор между валками, мм	Скорость верхнего вала, об/мин	Скорость нижнего вала, об/мин	Толщина после прокатки, мм
1	1	4	980	1,7	5	5	2,3
2	1	4	676	1,8	5	2,5	2
3	1	4	716	1,7	5	2,6	2
4	2	4	520	1,7	5	2,6	1,9
5	3	3,8	520	1,6	5	2,7	1,7
6	4	3,4	402	1,6	5	2,7	1,6

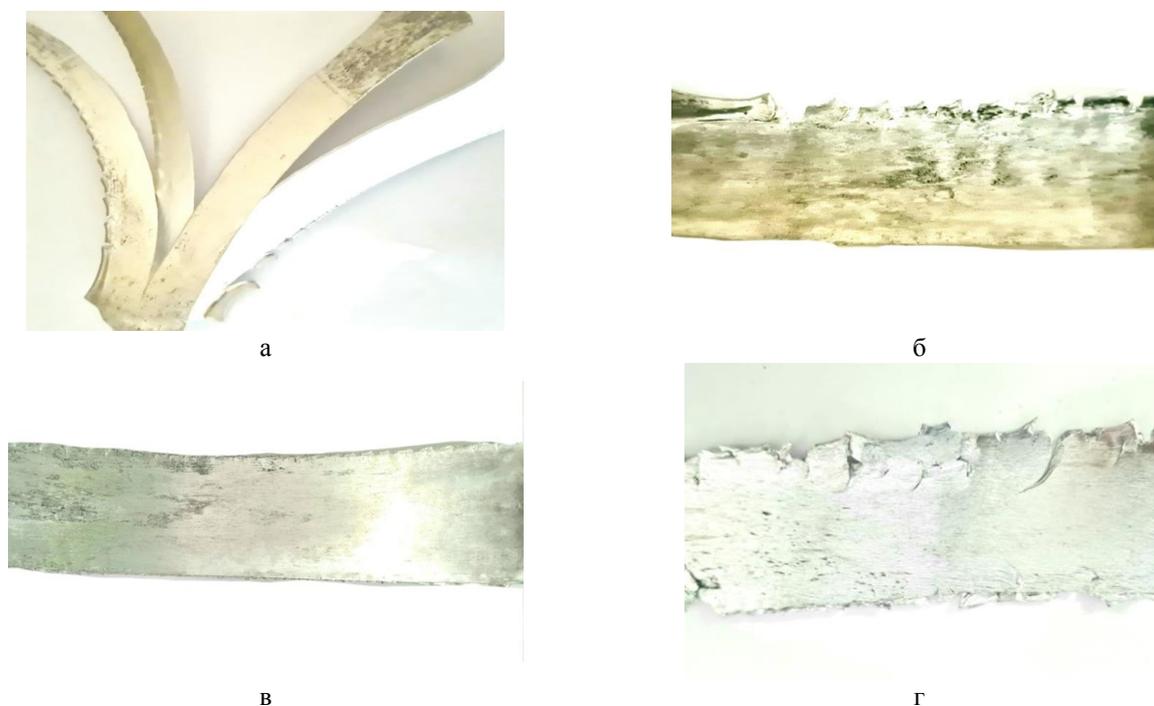


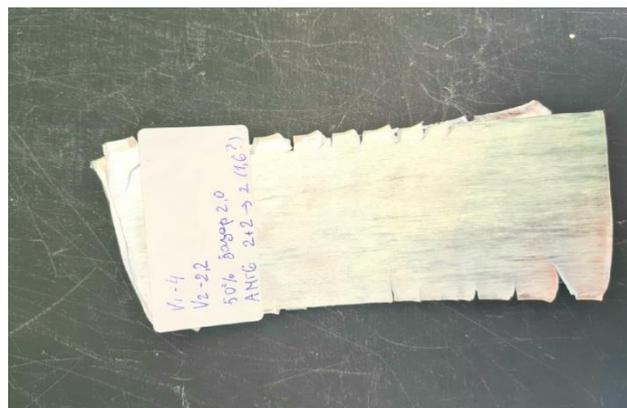
Рис. 9. Образцы алюминиевых сплавов после симметричной и асимметричной деформации: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 6

Входные и выходные параметры обработки алюминиевых сплавов 5-й серии на стане 400 асимметричной прокатки

Образец	Номер прохода	Начальная толщина, мм	Усилие прокатки, кН	Установленный зазор между валками, мм	Скорость верхнего валка, об/мин	Скорость нижнего валка, об/мин	Толщина после прокатки, мм
7	1	4	912	2	4	4	2,1
8	1	4	490	2	4	2,2	2,0
9	1	4	490	1,9	4	2,1	1,9
10	2	3,8	509	1,8	4	2,2	1,8
11	1	4	490	1,8	4	2,1	1,9
12	2	3,8	372	1,8	4	2,1	1,8



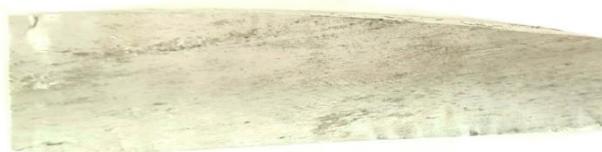
а



б



в



г

Рис. 10. Образцы алюминиевых сплавов после симметричной и асимметричной деформации: а – образец 7; б – образец 8; в – образец 11; г – образец 12

В итоге образцы 1 и 7 были разрушены во время обработки, слои металлов не сваривались между собой, кроме того, образовался порыв посередине образца. Асимметричная прокатка характеризуется не только уменьшением образования дефектов (все образцы показали хорошую свариваемость давлением), но и снижением усилий прокатки. При обработке образцов 1 (при симметричном случае) и 2 (при асимметрии) усилие прокатки снизилось на 304 кН (на 31 %). При деформировании образцов 7 (симметричный случай) и 8 (асимметричный случай) усилие прокатки снизилось на 421 кН (на 46 %). При проведении процесса аккумуляющей прокатки (образцы 3-6 и 9-12) также заметно снижалось усилие прокатки: с 716 до 402 кН при обработке 6-й серии и с 510 до 372 кН при обработке 5-й серии. В данном случае причиной снижения послужило уменьшение ширины образца при

обрезке боковых кромок. При этом обжатие варьировалось от 50 до 57% за проход, а суммарная степень обжатия составила более 213% для 6-й серии (за 4 цикла) и 105% для 5-й серии (за 2 цикла). Рассогласование скоростей валков варьировалось от 45 до 50% в зависимости от прохода. После всех циклов обработки был произведен замер твердости на твердомере EMCO TEST M4C/R G3, представленного на рисунке 11, методом Бринелля.

Твердость обработанного образца 6-й серии составила с верхней поверхности (со стороны валка с большей скоростью) 168 НВ, с нижней поверхности – 141 НВ, в то время как твердость исходного материала была 65 НВ, что показывает увеличение данного параметра больше чем в 2,5 раза. Средняя твердость обработанного образца 5-й серии после двух циклов прокатки составила с верхней поверхности 147 НВ, с

нижней поверхности – 145 НВ, твердость исходного материала – 81,8 НВ. Твёрдость сплава 5-й серии возросла в 1,8 раз.



Рис. 11. Твердомер EMCO TEST M4C/R G3 лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Заключение

Было проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов. Показано, что достижение максимального значения интенсивности деформации возможно в крайних точках алюминиевых материалов 5083/2024 и 6061/2024 при соприкосновении с валками. Значения интенсивности деформации переходного слоя ниже, чем в основных металлах. Попадание в область ИПД возможно после 2-го цикла процесса асимметричного деформирования. На это указывает совокупность значений интенсивности деформации и угла сдвига ϕ . В 1-м цикле процесса попадание в данную область при значении обжатия 50% для слоистых листовых композитов 5083/2024 и 6061/2024 невозможно. Градиент деформации может быть достигнут во всех слоях материала благодаря соблюдению установленных правил:

- 1) асимметричное деформирование при значении показателя коэффициента трения 0,3;
- 2) минимальный показатель отношения разности скоростей валков $V_1/V_2 = 40\%$;
- 3) для процесса обработки методом асимметричного деформирования требуется минимум 2 цикла обработки для попадания в область ИПД.

Экспериментальная проверка полученных результатов проводится на стане 400 асимметричной прокатки лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». По предварительным проверочным результатам были подтверждены механизмы протекания асимметричного деформирования при использовании образцов 5-й и 6-й серий. Показано, что применение асимметрии позволяет уменьшить образование дефектов и снизить усилия прокатки. При обработке образцов 1 (при симметричном случае) и 2 (при асимметрии) усилие прокатки снизилось на 31 %. При деформировании образцов 7 (симметричный случай) и 8 (асимметричный случай) усилие прокатки снизилось на 46%. Проведен замер твёрдости методом Бринелля на твердомере EMCO TEST M4C/R G3. Усредненные значения показали увеличение твёрдости при обработке 5-й серии после двух циклов в 1,8 раз, а при обработке 6-й серии после четырех циклов в 2,5 раза.

Благодарность

Исследование проводилось в рамках реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 (договор № 075-15-2019-869 от 12 мая 2019 г.), за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46042 от 20.05.2020), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90097 (договор №20-38-90097/20 от 03.09.2020).

Список литературы

1. Кобелев, А.Г. Материаловедение и технология композиционных материалов: учебник / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев, Е.В. Кузнецов. М.: Интермет Инжиниринг. 2006 368 с.
2. Костиков В.И. Физико-химические основы технологии композиционных материалов. Директивная технология композиционных материалов: учебное пособие. М.: МИСиС. 2011 163 с.
3. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. М.: Металлургиздат, 2004. 230 с.
4. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Свердлик М.К. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации: монография. Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. 151 с.
5. Zebing Xu Mechanical properties and surface characteristics of an AA6060 alloy strained in tension at cryogenic and room temperature / Zebing Xu, Hans J. Roven, Zhihong Jia. Materials Science and Engineering Vol. 648. 2015. P. 350–358.
6. Heydari M. Vini Mechanical Properties and Microstructural Evolution of AA5083/Al2O3 composites Fabricated by Warm Accumulative Roll Bonding// Advanced Design and Manufacturing Technology. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 10-17.

7. Heydari M. Vini Mechanical Mechanical properties and bond strength of bimetallic AA1050/AA5083 laminates fabricated by warm-accumulative roll bonding // Canadian Metallurgical Quarterly – 2017. P. 45-50.
8. Alvandi H. Microstructural and Mechanical Properties of Nano/Ultra-Fine Structured 7075 Aluminum Alloy by Accumulative Roll-Bonding Process/ H. Alvandia, K. Farmanesha. – 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, UFGNSM15. Procedia Materials Science Vol.11. 2015. P. 17 – 23.
9. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling //Key Engineering Materials. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.
10. Nageswara rao P., Kaurwar A., Singh D. Enhancement in Strength and Ductility of Al-Mg-Si alloy by Cryorolling followed by Warm rolling // Advance Publication by J-STAGE Mechanical Engineering Journal. 2014, Vol. 75. No. 1. P. 123-128.
11. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverdlik M.K. Mathematical modeling of grain evolution with asymmetric rolling of pure aluminum and alloy 7075 // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University. 2015, №4. P. 81-87.
12. Плохих, А.И. Исследование влияния технологических факторов на стабильность структуры многослойных материалов конструкционного назначения / А.И. Плохих, Минаков А.А. // Проблемы механики современных машин: Материалы VI Международной конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. Т. 1. С. 305–310.
13. Markushev M.V. On the effectiveness of some methods severe plastic deformation intended to obtain bulk nanostructured materials. Institute of Metals Superplasticity Problems RAS, Ufa, 2011. 43 p.
14. Romankov S. Formation of nanolaminated amorphous/crystalline structure in the multicomponent system under severe plastic deformation / Materials Letters Volume 85, 15 October 2012, pp. 109-112.
15. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Валиев Р.З., Александров И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
16. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Институт проблем сверхпластичности металлов РАН. Уфа, 2011. 43 с.
17. Рааб Г.И. Перспективы использования методов интенсивной пластической деформации для получения высокопрочных металлических материалов в промышленных масштабах // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: ИМЕТ РАН, 2011, С. 205-206.
18. Asaro R.J. Deformation Mechanisms and Manufacturing of Nanostructured Materials Processed by Severe Plastic Deformation/ Asaro R.J., Krysl P., Benson D. University of California, San Diego, 2003. 80 p.
19. Валиев Р.З. Равноканальное угловое прессование для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // Конструкции из композиционных материалов. 2004. № 4. С. 47-55
20. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Science. 2006. V. 51. P. 881-981.
21. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications // Progress in Materials Science. 2008. V. 53. P. 893-979.
22. Edalati K., Horita Z. A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988 // Materials Science and Engineering: A. 2016. V. 652. P. 325-352.
23. Zhilyaev A.P., Nurislamova G.V., Kim B.K., Baró M.V., Szpunar J.A., Langdon T.G. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion // Acta Materialia. 2003. V. 51. P. 753-765.
24. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. Study of deformed condition aluminium alloys 1070, 2024 and 5083 at asymmetric and package rolling by method final elements / Materials IIIrd international youth scientific and practical conference. 2018. №1. P. 3-5.
25. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetals during accumulative rolling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2018, №1. P.1-4.
26. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О. Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий 1xxx, 2xxx, 5xxx – 7xxx // Журнал технических исследований. 2019. Т. 5, №1. С.53-59
27. Бирюкова О.Д., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Влияние скоростной асимметрии на деформационное состояние в алюминиевом биметалле 5083/1070 при пакетной прокатке // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2018. № 1 (46). С. 44-49.
28. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д. Развитие процесса аккумулялирующей прокатки алюминиевых биметаллов на основе применения скоростной асимметрии // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции. 2016. С. 20-22.
29. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 23–28.

Сведения об авторах

Бирюкова Олеся Дмитриевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fimapatisationchik@inbox.ru.

Пустовойтов Денис Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pustovoitov_den@mail.ru.

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru.

Кожмякина Анна Евгеньевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE POSSIBILITY OF OBTAINING A GRADIENT STRUCTURE OF THE ALUMINUM LAMINATED COMPOSITE DURING ASYMMETRIC DEFORMATION

Biryukova Olesya D. – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fimapatisationchik@inbox.ru.

Pustovoitov Denis O. – Ph.D. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pustovoitov_den@mail.ru.

Pesin Alexander M. – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru

Kozhemiakina Anna E. – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

Abstract. Laminated materials are popular in the transport, chemical, and oil industries. The range of products is wide: from strips and sheets to special-purpose profiles. It is necessary to develop technologies for the processing of laminated materials that allow obtaining a high level of mechanical properties. In this regard, the process of asymmetric deformation of aluminum laminated sheet composites is considered. An analysis of the regularities of the rolling process of aluminum alloys was carried out to determine the rational parameters. It would ensure the straightness of the metal exit from the deformation zone and the required gradient structure of each of constituent layers. The analysis was carried out on the basis of simulation of experiments in the Deform 2D software package. The results show that the required level of deformation gradient can be achieved in all layers of the laminated sheet composite due to correctly selected rolling parameters. A preliminary verification of the simulation results was carried out at the asymmetric rolling mill 400 of the Zhilyaev Mechanics of Gradient Nanomaterials Laboratory of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Samples of aluminum alloys of the fifth and sixth series were used and prepared for processing according to the established technology. The advantages of asymmetric deformation over symmetric are shown. The results of hardness tests by the Brinell method are presented.

Key words: asymmetric deformation, aluminum alloy, equivalent deformation, deformation intensity, computer simulation, severe plastic deformation.

Ссылка на статью:

Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.Е. Кожмякина // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 38-46.
Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Kozhemiakina A.E. The possibility of obtaining a gradient structure of the aluminum laminated composite during asymmetric deformation. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 38-46.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в издании научного журнала «*Теория и технология металлургического производства*» («*Teoriã i tehnologiã metallurgiĉeskogo proizvodstva*») (Аббревиатура: **Teor. tehnol. metall. proizv.**) Периодичность издания – 4 раза в год.

Журнал зарегистрирован в Научной электронной библиотеке, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). ISSN 2311-5378. Не забывайте в библиографических ссылках статей указывать свои труды и труды Ваших коллег для повышения индекса научного цитирования и изданий в целом.

Журнал включает в себя следующие разделы:

1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.
2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.
3. Литейное производство.
4. Обработка металлов давлением.

Для публикации статьи в журнале необходимо представить **следующие материалы:**

- электронную версию статьи выслать по электронной почте;
- экспертные заключения о возможности опубликования от всех организаций, сотрудниками которых являются авторы статьи;
- контактный E-mail: , контактный телефон, почтовый адрес для получения экземпляра журнала;
- адрес редакции Ленина пр., д. 38, г. Магнитогорск, 455000. Тел. (3519) 29-85-18, E-mail: TТаPEoMP@mail.ru; ttmp@magtu.ru.
- лицензионный договор на передачу прав
- авторская справка

Авторам, представившим статьи для публикации, будет выслан один экземпляр журнала. Материалы, переданные в журнал, редакционной коллегией не возвращаются.

Статьи должны быть выполнены в текстовом редакторе MS Office Word 2007 и оформлены в соответствии со следующими требованиями:

- формат страницы – А4 (210x297мм), отступы: слева, справа и сверху по 18 мм, снизу – 20 мм; нумерация страниц снизу по центру;
- шрифт основного текста – Times New Roman размера 12 пунктов;
- межстрочный интервал – одинарный;
- отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 5 знаков (примерно 10 мм);
- формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается; размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов;
- горизонтальные страницы допускается оформить отдельно от вертикальных страниц статьи, они должны быть также формата А4;
- рисунки должны быть вставлены в текст;
- не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу;
- статья должна включать: УДК, авторов, название, аннотацию, ключевые слова, текст, список литературы, сведения об авторах.
- структура основной части статьи: введение, теория, результаты исследования, заключение. Пример оформления статьи приведен в **(Приложении 1)**.
- аннотация (*Abstracts*) (150-250слов), выполняется курсивом (аннотация должна быть логически выстроена);
- ключевые слова (*Keywords*) (5-15 основных терминов), выполняется курсивом;
- список литературы выполняется в соответствии с требованиями (пример оформления литературы приведен в **(Приложении 2)**);
- сведения об авторах (*Information about authors*) должны включать: Ф.И.О. полностью, должность, место работы, ученая степень, ученое звание, контактный телефон, электронный и почтовый адреса;
- в конце статьи дается английская версия фамилий, инициалов авторов, названия статьи, авторского резюме, ключевых слов, сведений об авторах. **За качество перевода несут ответственность авторы статьи. Использование электронного переводчика не допустимо.**

Редакционная коллегия оставляет за собой право исправлять орфографические ошибки без согласования с авторами.

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА УЗКИХ ГРАНЕЙ СЛЯБОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ*Аннотация. 150-250 слов**Ключевые слова: 5-15 основных терминов*

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

IMPROVING THE QUALITY OF NARROW FACES CONTINUOUS SLAB BILLET*Abstract. 150-250 words**Keywords: 5-15 basic terms**References:**Information about authors*

Пример оформления литературы

Список литературы

1. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1 (41). С. 27 – 30.
2. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Влияние температуры разливаемого металла на качество непрерывнолитого сляба и листового проката // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. Вып.12. С. 68–74.
3. Пат. 2061756 РФ, МПК С 21 В 7/00. Доменная печь / Курбацкий М.Н., Манаенко И.П., Монастырков В.П. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Товарищество с ограниченной ответственностью «Техника и технология» (RU). № 9305232/02; заявл. 18.11.93; опубл. 10.06.96, Бюл. № 16. 4 с.: ил.
4. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Севернюк В.В. Работа воздушных фурм доменных печей. Днепропетровск: Пороги, 1997. 120 с.
5. Лукашов Г.Г., Савелов Н.И., Плискановский С.Т. Опыт работы доменных печей на воздушных фурмах различного диаметра // Сталь. 1972. № 7. С. 587-589.
6. Максимов Е.В., Альжанов М.К., Ержанов У.К. Влияние параметров фурмы на перепад газа в доменной печи. // Тез. докл. III Международного конгресса доменщиков. Новокузнецк, 1995. С.120.

На английском языке: Авторы (транслитерация). Название статьи на английском языке. Название журнала курсивом (транслитерация) [Название журнала на английском языке (если есть)]. Выходные данные на английском языке, либо цифровые.

1. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using “Mini whale” effect. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 1(37), pp. 24-26.

Ответственный по изданию журнала: канд. техн. наук. Тютеряков Н.Ш.

По всем вопросам обращаться по тел.: +7 (3519)29-85-18, 89049410710, либо по E-mail: ttmp@magtu.ru