

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
академик **Б. Е. Патон**

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

д.т.н. **Г. М. Григоренко** (зам. гл. ред.),
д.т.н. **С. В. Ахонин**, **Д. М. Дяченко** (отв. секр.),
д.т.н. **И. В. Кривцун**, д.т.н. **Л. Б. Медовар**,
д.т.н. **Б. А. Мовчан**, д.т.н. **А. С. Письменный**,
д.т.н. **А. И. Устинов**, д.т.н. **В. А. Шаповалов**

Ученые университетов Украины

д.т.н. **В. С. Волошин**, ПГТУ, Мариуполь
д.т.н. **М. И. Гасик**, НМетАУ, Днепр
д.т.н. **О. М. Ивасишин**, Ин-т металлофизики, Киев
д.т.н. **П. И. Лобода**,
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского», Киев
д.т.н. **А. В. Овчинников**, ЗНТУ, Запорожье

Зарубежные ученые

д.т.н. **К. В. Григорович**
МИСиС, Москва, РФ
д.х.н. **М. Зиниград**
Ун-т Ариэля, Израиль
д.т.н. **А. А. Ильин**
МАТИ-РГТУ, Москва, РФ
д.ф.-м.н. **Г. Младенов**
Ин-т электроники, София, Болгария
д.т.н. **А. Митчелл**
Ун-т Британской Колумбии, Канада
д.т.н. **Г. Ф. Тавадзе**
Ин-т металлург. и материаловед.
им. Ф. Тавадзе, Тбилиси, Грузия
д.т.н. **Цохуа Джанг**
Северо-Восточный ун-т, Шеньян, Китай

Учредители

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка» (издатель)

Адрес редакции журнала
«Современная электрометаллургия»

Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Украина, 03150, г. Киев,
ул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77, 200 54 84
Тел.: (38044) 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

Д. М. Дяченко, **Т. В. Юштина**
Электронная верстка
Л. Н. Герасименко, **Т. Ю. Снегирева**

Свидетельство о государственной регистрации
КВ 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445

DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

Рекомендовано к печати

Ученым советом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Журнал входит в перечень утвержденных МОН
Украины изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов ссылка на журнал
обязательна. За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

СОДЕРЖАНИЕ

К 60-летию ЭШП!	3
60 лет ЭШП на заводе «Днепроспецсталь»	4
Давидченко С. В., Панченко А. И., Билоник И. М., Логозинский И. Н., Сальников А. С., Федыкой А. Г. Исследование влияния инокуляторов на диспергирование литой структуры стали X12МФ-Ш	13
Чжоу-хуа Цзян, Сю Чень, Синь Ген, Цян Ю. Металлургические характеристики крупных слябов, полученных электрошлаковым переплавом	19
Медовар Л. Б., Стовпченко А. П., Полишко А. А., Коломиец Д. А., Педченко Е. А., Зайцев В. А. Современные рельсовые стали и возможности ЭШП (Обзор). Сообщение 2. Требования стандартов к химическому составу стали для железнодорожных рельсов магистральных путей	28
Григоренко Г. М., Козин Р. В. Растворимость азота во флюсах для электрошлаковых технологий	37
Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Лентюгов И. П., Жданов В. А. Роль шлаковой ванны в процессе наплавки в токоподводящем кристаллизаторе	41
Протокивилон И. В., Назарчук А. Т., Петров Д. А., Порохонько В. Б. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа	45
Кусков Ю. М., Биктагиров Ф. К., Грищенко Т. И., Евдокимов А. И. Формирование структуры высокохромистого чугуна, наплавленного дробью в токоподводящем кристаллизаторе	52
Технологии проектирования и изготовления узлов медных кристаллизаторов	56
Специальное металлургическое оборудование: электропечи компании «Zhenwu»	62

ЗМІСТ

CONTENTS

До 60-річчя ЕШП!	3
60 років ЕШП на заводі «Днепрспецсталь»	4
<i>Давидченко С. В., Панченко А. І., Білонік І. М., Логозинський І. Н., Сальніков А. С., Федьков А. Г.</i> Дослідження впливу інокуляторів на диспергування литої структури сталі Х12МФ-Ш	13
<i>Чжоу-хуа Цзян, Сю Чень, Синь Ген, Цян Ю.</i> Металургійні характеристики великих слябів, отриманих електрошлаковим переплавом	19
<i>Медовар Л. Б., Стівченко Г. П., Полішко Г. О., Коломієць Д. О., Педченко Є. О., Зайцев В. А.</i> Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд). Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізничних рейок магістральних колій	28
<i>Григоренко Г. М., Козін Р. В.</i> Розчинність азоту у флюсах для електрошлакових технологій	37
<i>Кусков Ю. М., Соловйов В. Г., Лентюгов І. П., Жданов В. О.</i> Роль шлакової ванни в процесі наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі	41
<i>Протоковілов І. В., Назарчук О. Т., Петров Д. А., Порохонько В. Б.</i> Технологічні та металургійні особливості виплавки зливків титанових сплавів в електрошлакових печах камерного типу	45
<i>Кусков Ю. М., Біктагіров Ф. К., Грищенко Т. І., Євдокимов А. І.</i> Формування структури високохромистого чавуну, наплавленого дробом в струмопідвідному кристалізаторі	52
Технології проектування і виготовлення вузлів мідних кристалізаторів	56
Спеціальне металургійне обладнання: електропечі компанії «Zhenwu»	62

To 60 th anniversary of ESR	3
60 years of ESR at the «Dneprospsstal» plant	4
<i>Davidchenko S.V., Panchenko A.I., Bilonik I.M., Logozinsky I.N., Salnikov A.S., Fedkov A.G.</i> Investigation of effect of inoculators on dispersion of steel Kh12MF-Sh cast structure	13
<i>Zhou-hua Jiang, Xu Chen, Xin Geng, Qiang Yu.</i> Metallurgical characteristics of large slabs, produced by electroslag remelting	19
<i>Medovar L.B., Stovpchenko A.P., Polishko A.A., Kolomiets D.A., Pedchenko E.A., Zaitsev V.A.</i> Modern rail steels. application of ESR (Review). Information 2. Requirements of standards to chemical composition of steel for railway rails of main-line tracks	28
<i>Grigorenko G.M., Kozin R.V.</i> Nitrogen solubility in fluxes for electroslag technologies	37
<i>Kuskov Yu.M., Solovjev V.G., Lentjugov I.P., Zhdanov V.A.</i> Role of slag pool in process of surfacing in current-carrying mould	41
<i>Protokovilov I.V., Nazarchuk A.T., Petrov D.A., Porokhonko V.B.</i> Technological and metallurgical peculiarities of melting the titanium alloy ingots in chamber-type electroslag furnaces	45
<i>Kuskov Yu.M., Biktagirov F.K., Grishchenko T.I., Evdokimov A.I.</i> Formation of structure of high-chromium cast iron, surfaced by shots in current-carrying mould	52
Technologies of design and manufacturing of copper crucible assemblies	56
Special metallurgy equipment: electric furnaces of «Zhenwu» company	62

Адреса редакції журналу

«Сучасна електрометалургія»
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України
Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77, 200 54 84; тел.: 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com
Свідцтво про державну реєстрацію КВ 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

Editorial Address

of Journal «Electrometallurgy Today»
The E. O. Paton Electric Welding Institute, NASU
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200 82 77, 200 54 84; Tel.: 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com
State Registration Certificate KV 6185 of 31.05.2002
ISSN 2415-8445, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

К 60-летию ЭШП!

Весной 1958 г. в Украине на заводе «Днепропецсталь» (г. Запорожье) и «Новокраматорском машиностроительном заводе» (г. Краматорск) впервые в мире началось промышленное производство стали высочайшего качества способом электрошлакового переплава (ЭШП) — переплава расходуемых электродов в водоохлаждаемом кристаллизаторе под действием переменного тока, проходящего через синтетический шлак. Созданный в Институте электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) новейший металлургический процесс быстро распространился по миру благодаря лицензиям на технологию и оборудование, которые приобретали металлургические компании различных стран.

Именно с появлением ЭШП сформировалось новое направление в металлургии — специальная электрометаллургия. Долгое время исследователи и конструкторы ИЭС были бесспорными лидерами в гонке с передовыми мировыми компаниями и университетами как в исследовании процесса ЭШП, так и в создании оборудования для различных технологий ЭШП (получение листовых, полых, а также крупных кузнечных слитков). Знаковым событием этого этапа было создание нашими специалистами технологии и оборудования печи ЭШП для получения 40-тонных листовых слитков так называемых «Z-сталей» с высокими свойствами по толщине проката. Именно благодаря бифилярной технологии ЭШП листовых слитков достигнуты непревзойденные и сегодня показатели изотропности физико-механических свойств высокопрочных хромоникелемолибденовых сталей, из которых были построены корпуса атомных подводных лодок в СССР. Еще одно направление, созданное именно в ИЭС, — это получение электрошлакового литого металла с механическими свойствами на уровне деформированного.

Отметим, что только сегодня благодаря этим работам становятся понятными технико-экономические преимущества ЭШП именно по сочетанию высокого металлургического качества металла с существенным уменьшением отходов по сравнению с другими технологическими процессами производства сталей и сплавов, особенно для изделий большого веса.

Напомним, что в начале своего победного пути в промышленности ЭШП был способом получения стали с минимальным уровнем вредных примесей и популярный сегодня среди металлургов термин «чистая сталь» был предложен именно в ИЭС для металла ЭШП (Патон Б. Е., Медовар Б. И. (1966) Чистая Сталь, Киев), а теперь он широко применяется металлургами мира для современных сталей, прошедших внепечную обработку. В этом году будет проведена десятая традиционная международная конференция под этим же названием (<http://cleansteel10.com/index.php>). Можно сказать, что современные требования к чистоте стали любых способов производства во многом базируются на стандартах чистоты металла электрошлакового переплава.

В современной практике ЭШП для удаления вредных примесей почти не применяют. Он нужен прежде всего для управления затвердеванием металла, уменьшения неоднородности его литой структуры и соответственно обрезки головной и донной частей слитков. Наиболее показателен пример изготовления роторов для мощных турбин блоков «миллионников» АЭС. Дляковки такого ротора используют кузнечный слиток весом не менее 600...650 т. Сегодня ведутся работы по замене таких уникальных слитков 450-тонными слитками ЭШП. А конечный вес ротора будет одинаковый — менее 300 т. Мировая практика показывает, что упрощенный вид ЭШП (электрошлаковая подпитка) является действенным при весе слитков примерно до 100...150 т. При увеличении веса целесообразнее использовать ЭШП. Поэтому последние десятилетия отмечены своеобразным возрождением печей ЭШП для получения слитков массой 100...200 т, заменяющих обычные отлитые в изложницы кузнечные слитки массой 140...280 т.

Продолжаются и углубляются научные исследования физико-химических особенностей ЭШП во всем мире. Это становится основой для освоения новых сталей и сплавов, использования возможностей капельного переноса металла при ЭШП, создания все более совершенных математических моделей процесса.

Некоторые результаты исследований электрошлакового процесса собраны в этом юбилейном номере. Этапы промышленного развития и внедрения ЭШП в Украине представлены в статье наших коллег — специалистов славной «Днепропецстали».

От редколлегии

60 ЛЕТ ЭШП НА ЗАВОДЕ «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ»

Начало развития способа ЭШП приходится на середину сороковых годов прошлого столетия. В то время специалисты Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР вопреки мнению многочисленных оппонентов показали, что решением проблемы надежности сварных конструкций является повышение чистоты и однородности структуры основного металла [Медовар Б. И., Латаш Ю. В. (1965) *Электрошлаковый переплав*. Киев, Наукова думка]. Эта идея послужила толчком для проведения колоссальных работ по улучшению качества стали. Начиная с 1954 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством академика Б. Е. Патона группа ученых в лице докт. техн. наук Б. И. Медовара, канд. техн. наук Ю. В. Латаша и инженера Б. Н. Максимова проводили исследовательские разработки способов улучшения качества стали. Результаты глубоких научных исследований качества металла слитков в несколько килограммов, наплавленных на аппаратах электрошлаковой сварки, стали началом по внедрению в производство способа ЭШП.

В 1957 г. в г. Свердловске (сейчас г. Екатеринбург) на Всесоюзном совещании сталеплавателей Б. Е. Патон, Б. И. Медовар и Ю. В. Латаш сделали доклад «Электрическая выплавка высоколегированной стали и сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе». Так на стыке двух областей техники — сварки и металлургии родился новый прогрессивный процесс — электрошлаковый переплав.

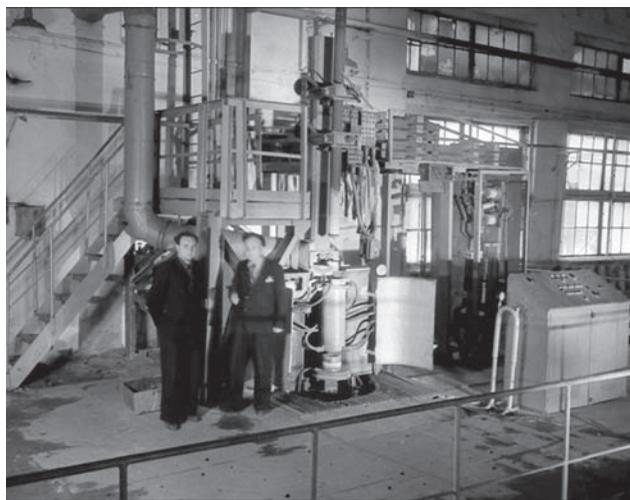


Рис. 1. Первая в мире опытно-промышленная печь ЭШП Р-909. Стоят у печи слева направо Ю. В. Латаш и Г. П. Маликов (ИЭС им. Е. О. Патона и ДСС), май 1958 г.

«ВПЕРВЫЕ В СОЮЗЕ», «ВПЕРВЫЕ В МИРЕ»!

Именно эти слова и понятия уверенно звучали в конце 50-х гг. на заводе «Днепроспецсталь», когда речь шла о внедряемых в производство принципиально новых способах выплавки стали — электрошлаковым и вакуумно-дуговым переплавах.

Внедрение в жизнь промышленного способа получения электрошлаковой стали осуществилось благодаря директору завода «Днепроспецсталь» А. Ф. Трегубенко, который обладал удивительным чутьем на все новое и перспективное, а также самому яркому приверженцу новых металлургических процессов С. А. Лейбензону.

Выдержка из книги «Это наша с тобой биография» [Лейбензон В. А., Кренделев В. Н. (2000) *Это наша с тобой биография*. Запорожье, Издательство «Тандем-У»]: «В 1957 г. по заводу поползли тревожные слухи: директор затевает в СПЦ-1 какое-то опасное дело. Из адъюстажного отделения вывезли все оборудование и начали строить вакуумные дуговые печи, за которыми уже тянулся шлейф дурной славы. Плавил раньше в этих печах слитки титана и незадолго до этого произошло несколько взрывов печей с человеческими жертвами и большими разрушениями. Это одно. Но он еще начал строить печь совсем неведомого назначения, которое называли «электрошлаковый переплав» (ЭШП). Идею и первую опытно-промышленную печь под это назначение привезли из Киева, из Института электросварки имени Е. О. Патона (ИЭС). Было известно, что суть этого процесса заключается в расплавлении стальной штанги в слое шлака, температура которого достигает 2000 °С. А весь процесс происходит в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Да какая же медь выдержит эту «сумасшедшую» температуру? «Жахнет», как пить дать! Ой, мудрит директор... Тем более, что его никто особенно и не заставлял это делать. Насчет освоения вакуумного дугового переплава (ВДП) стали указания министерства носили больше рекомендательный характер, там тоже побаивались взрывов, а об ЭШП в министерстве вообще толком ничего не знали, хотите — стройте на свой страх и риск и за свой счет. И А. Ф. Трегубенко строил, чуял — дело стоящее. И не ошибся. Первая плавка ЭШП была выплавлена 28 мая 1958 г. на установке Р-909 (рис. 1). Плавку подготовили и «варили» под руководством представителей ИЭС, плавильный мастер СПЦ-1 Л. И. Лаврентьева и сталевар И. Серый. Участвовали в плавке, как положено, дежурный слесарь и электрик, присутствовали



Рис. 2. Первые слитки ЭШП

на плавке руководители цеха и представители некоторых отделов и служб завода.

На первой плавке не было, как обычно в таких случаях, «вавилонского столпотворения» — недобрые слухи о новых процессах сделали свое дело. К окончанию плавки пришел А. Ф. Трегубенко, ознакомился с ходом процесса. После отключения печи и небольшой выдержки слиток извлекли из кристаллизатора, оббили с его поверхности шлак и увидели... совершенно гладкую поверхность без литейных дефектов, свойственных слиткам, отлитым в изложницы. Первый слиток был диаметром 250 мм, весил 300 кг».

Таким образом, впервые в мире, впервые в союзе 28 мая 1958 г. на заводе «Днепроспецсталь» получен полупромышленный слиток электрошлакового переплава (рис. 2). Новое структурное подразделение на заводе было отнесено к ЦЗЛ как вакуумная лаборатория, возглавил ее заместитель начальника ЦЗЛ С. А. Лейбензон, которого позднее назначили начальником пятого сталеплавильного цеха.

Результаты по качеству металла первых плавков были, что называется, ошеломляющими. Металл ЭШП отличался от металла обычной выплавки удивительной плотностью и однородностью, а главное — низкой загрязненностью неметаллическими включениями. Выполнение исследований качественных характеристик металла контролировал лично А. Ф. Трегубенко, которые тщательно проводились группой специалистов ЦЗЛ. В результате директор завода А. Ф. Трегубенко принимает решение строить промышленные печи по производству слитков ЭШП своими силами.

Рассказывает главный механик завода того времени В. И. Немзер: «Была создана проектная группа из конструкторов проектного отдела и конструкторского бюро отдела главного механика (КБ ОГМ). Поставлена задача: спроектировать трехфазную электрошлаковую печь. Проектирование шло сложно и трудно, так как это была первая печь в мире и опыта проектирования не было,

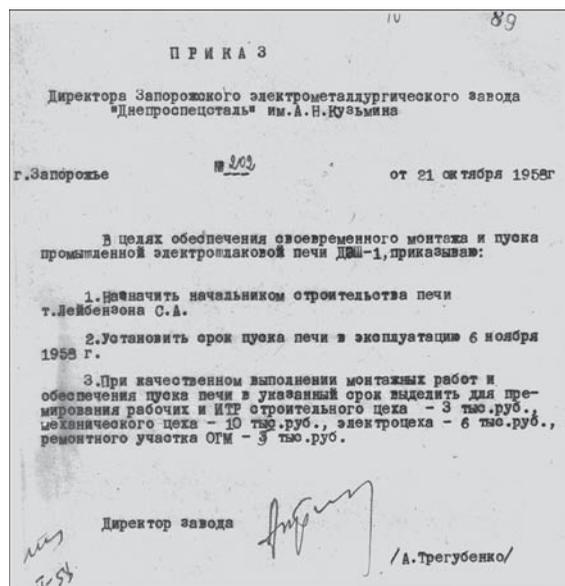


Рис. 3. Приказ директора завода «Днепроспецсталь» о вводе печи ЭШП ДЭШ-1 (ДСС-1) в эксплуатацию

твердо сказать делаем правильно или нет затруднялись». Проект был выполнен в срок и изготовление двух трехфазных печей поручили службе главного механика. Согласно приказу № 202 от 21 октября 1958 г. печь планировали ввести в эксплуатацию 6 ноября 1958 г. (рис. 3). Заводские специалисты ремонтно-механического и электроремонтного цехов почти в установленный срок смонтировали и ввели в эксплуатацию в декабре 1958 г. две первые промышленные печи для электрошлакового переплава [Лейбензон С. А., Трегубенко А. Ф. (1962) *Производство стали методом электрошлакового переплава*. Москва, Металлургиздат] (рис. 4), чем положили начало промышленного внедрения новой технологии производства высококачественной стали».

Новая установка промышленного назначения, названная ДСС-1 (ДЭШ-1), состояла из двух одинаковых блоков. Каждый блок состоял из трех кристаллизаторов съемной конструкции. На печи можно было использовать различные кристалли-

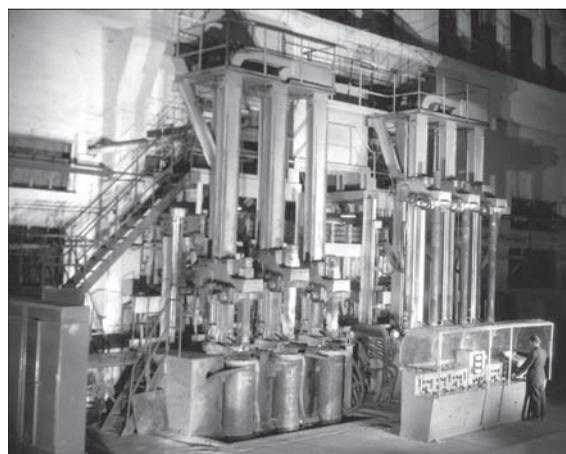


Рис. 4. Первая промышленная установка ДСС-1



Рис. 5. С. А. Лейбензон — первый начальник электрошлакового цеха СПЦ-5 на заводе «Днепропеталь»

затары: диаметром 300 и 425 мм (масса слитков 700 и 1100 кг соответственно) и квадратного сечения со стороной 310 мм (1100 кг).

С пуском промышленной печи ЭШП вакуумная лаборатория была ликвидирована и образован новый цех — СПЦ-5 (сталеплавильный цех № 5) во главе с С. А. Лейбензоном (рис. 5).

Металл ЭШП пошел к потребителю, отзывы были самые восторженные и его стали требовать в больших количествах. Печи ЭШП начали строить на электрометаллургических и некоторых машиностроительных заводах, а затем лицензии на процесс ЭШП были закуплены основными развитыми капиталистическими странами. Началось триумфальное шествие процесса ЭШП по всему миру.

Первые публикации о новом эффективном процессе получения высококачественных слитков, а значит сортового проката и листа, специальных профилей и поковок буквально всколыхнули мировую металлургическую общественность.

Кроме приобретения лицензий на использование процесса ЭШП крупные зарубежные металлургические компании приглашали специалистов ДСС и ИЭС на шефмонтаж, пуск оборудования и обучение специалистов работе на печах ЭШП, приемам работы и искусству получения особо



Рис. 6. Академик Б. И. Медовар докладывает о ходе работ Президенту АН СССР В. М. Келдышу в СПЦ-5

высококачественных слитков из сталей и сплавов самого широкого назначения. Одной из первых фирм, пригласивших группу из четырех специалистов-технологов из ИЭС им. Е. О. Патона в 1970 г., была шведская фирма «Авеста-Ернберг» (г. Авеста). От завода «Днепропеталь» в состав этой бригады был включен заместитель начальника СПЦ-5 Казаков С. С. Следует отметить, что работали все не только в качестве консультантов, приходилось работать сталеварами, проектантами, сварщиками, операторами и даже машинистами кранов, невзирая на должности и звания.

При выполнении контрактов основную долю опытных плавок выполняли исключительно украинские специалисты и лишь затем к печи постепенно допускались сотрудники компании. Следует отметить, что в процессе освоения печи на «Авесте» сразу были выплавлены листовые слитки массой 10 т, из которых получен полируемый лист из нержавеющей стали, полностью отвечающий требованиям заказчиков из Англии и других стран.

В конце 60-х годов специальными решениями директивных органов страны было принято решение об организации производства крупногабаритного толстолистого проката из слитков ЭШП для нужд оборонной техники. Работу проводили специалисты завода «Днепропеталь», ИЭС, ЦНИИЧермет, «Прометей» и других организаций. В самые сжатые сроки в СПЦ-5 были смонтированы и пущены в эксплуатацию сначала две печи У-436, затем ЭШП-16 и вскоре три печи ЭШП-20. Этой работе придавалось исключительно важное значение со стороны Академии Наук.

В 1973 г. на пуск 40-тонной листовой печи ЭШП, разработанной по проекту ИЭС им. Е. О. Патона, командирована очередная группа украинских специалистов. Печь была смонтирована на одном из заводов крупнейшей в мире сталеплавильной



Рис. 7. Бригада украинских специалистов во главе с Б. И. Медоваром (третий слева) вместе с сотрудниками фирмы «Ниппон Стил Корпорэйшин» на 40-тонном слитке ЭШП, Япония, г. Явата, 1974 г.

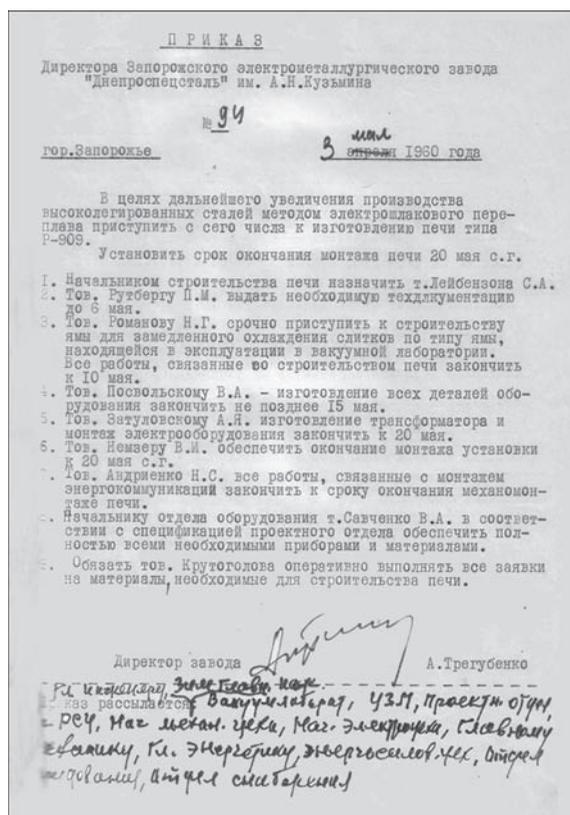


Рис. 8. Приказ директора завода А. Ф. Трегубенко о строительстве печи P-909 № 94 от 03 мая 1960 г.

компании «Ниппон Стил Корпорэйшн» (Япония, г. Явата). В группу специалистов включили знаменитого сталевара, работающего на листовых печах СПЦ-5 ДСС Миняйло Н. И. В команде от ИЭС состоял ныне доктор технических наук Богаченко А. Г., который при освоении листовых печей на заводе «Днепрспецсталь» в прямом смысле слова дневал и ночевал в цехе. Это был замечательный тандем, который отлично работал в Японии.

На рис. 7 запечатлен уникальный листовой слиток весом 40 т, на котором расположились японские и украинские специалисты, среди которых академик НАН Украины Медовар Б. И. (третий слева), Богаченко А. Г. (четвертый слева) и Миняйло Н. И. (шестой слева).

В 1974–1975 гг. передавали технологию и свои навыки по введению в эксплуатацию печи ЭШП на заводе «Благый Попов» (Болгария, г. Перник). В состав делегации кроме специалистов ИЭС им. Е. О. Патона были включены и специалисты завода «Днепрспецсталь» — заместитель начальника СПЦ-5 С. С. Казаков и сталевар СПЦ-5 В. И. Зиновьев. Все пункты контрактов были успешно выполнены.

Продолжим наши воспоминания как осваивали процесс ЭШП на заводе «Днепрспецсталь» и как менялся сам завод.

С целью увеличения производства стали способом ЭШП директор завода А. Ф. Трегубенко вы-

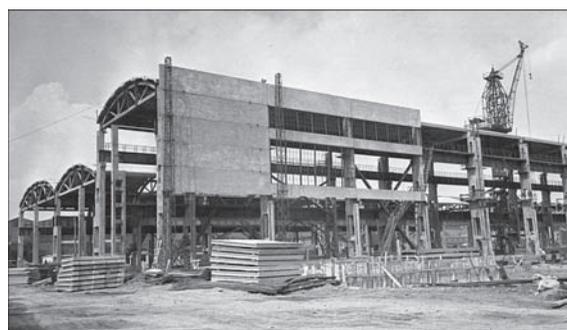


Рис. 9. Фрагмент строительства основного здания СПЦ-5 пускает приказ № 94 от 3 мая 1960 г. о строительстве печи ЭШП P-909 (рис. 8).

Необходимость увеличения производства стали и улучшение его качественных характеристик стимулировалось в то время государством в связи с возрастающей потребностью страны в металле для нужд оборонной промышленности. И в августе 1961 г. начинается строительство нового крупнейшего в Европе цеха электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов (рис. 9, 10).

Техническое задание для проектирования цеха готовили специалисты нашего завода с самым активным участием сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона и с привлечением компетентных представителей технологических и проектных институтов. Проектировала цех запорожская бригада «Укр-гипромеза» (руководитель Ю. А. Матвиенко). Но сам по себе цех должен был представлять только часть, хотя и главную, целого комплекса, в который входили: строящееся в СПЦ-1 отделение полупрерывной разливки стали (УПНРС) для отливки электродов и проектируемый для завода кузнечно-прессовый цех (КПЦ), значительную часть производственной программы которого должны были составлять поковки из слитков ЭШП и ВДП.

Головной цех комплекса СПЦ-5 построили трехпролетным с открытой эстакадой для раскроя электродов. Печной пролет цеха состоял из двух отделений — ЭШП и ВДП. В отделении ЭШП монтировали печи для выплавки сортовых слит-



Рис. 10. Фрагмент строительства сортового отделения ЭШП-1 СПЦ-5

ков (для производства прутков и поковок) двух типов: ОКБ-1065 под слиток максимального веса 4,2 т (основной электрод литой квадрат 370 мм) и ОКБ-905 под слиток максимального веса 2,5 т (основной электрод — литой круг 235 мм). Печи для этого отделения спроектировали и построили на Дагестанском заводе электротермического оборудования (ДагЗЭТО). Позже для этого отделения в ИЭС им. Е. О. Патона спроектировали печи ЭШП типа У-328 и У-436 с прямоугольными кристаллизаторами для выплавки листовых слитков весом 5 и 10...12 т соответственно из катаных электродов необходимых размеров. Хотя проект этих печей был, но изготавливать их ни один специализированный завод не брался и пришлось уже ранее проверенным способом строить эти печи силами машиностроительных предприятий Запорожской области. Так были строены печи типа У-436, а печь У-328 создана в ИЭС и передана заводу.

Отделение ВДП было в основном оснащено печами типа ДСВ-6,3-Г6 — дуговые, сталеплавильные, вакуумные печи с максимальным диаметром кристаллизатора 630 мм для получения слитка весом до 6-ти т. Под эти слитки отливали электроды в составные кокильные изложницы. Промежуточным для этих печей был кристаллизатор диаметром 500 мм под слиток весом до 4-х т для переплава литых на УПНРС электродов диаметром 405 мм. Второй тип печей для отделения ВДП-ДСВ-3,2-Г1, т. е. с кристаллизатором диаме-

тром 320 мм для получения слитков весом до 1-й т из литых электродов диаметром 235 мм.

В СПЦ-5 параллельно печному пролету строили термическое отделение с колпаками для замедленного охлаждения и электрокологдами для термообработки слитков ЭШП и ВДП. Далее следовало адьюстажное отделение, оснащенное отрезными и обдирочными станками для обдирки электродов и слитков ВДП. Были в этом отделении и установки для зачистки поверхности электродов ЭШП. Напомним, что КПЦ в середине 60-х гг. был еще только в стадии проектирования и на него (в части освоения производства металла переплавных процессов) в это время надежды не возлагали. Так был задуман на заводе комплекс по производству стали и сплавов способами ЭШП и ВДП. Большинство этих замыслов воплощены в жизнь и, более того, многие элементы намеченной технологической цепочки позже были уточнены и усовершенствованы. СПЦ-5 завода «Днепрспецсталь» по большинству параметров, не исключая и эстетическую сторону вопроса, получился на славу и после его полного запуска в работу стал объектом паломничества металлургов из многих стран мира.

Пуск СПЦ-5 состоялся в июле 1966 г. Из книги М. С. Вульфовича: «К этому времени завод располагал ограниченным парком кристаллизаторов, освоенных ранее в вакуумной лаборатории, под максимальный слиток квадрат 350 мм весом

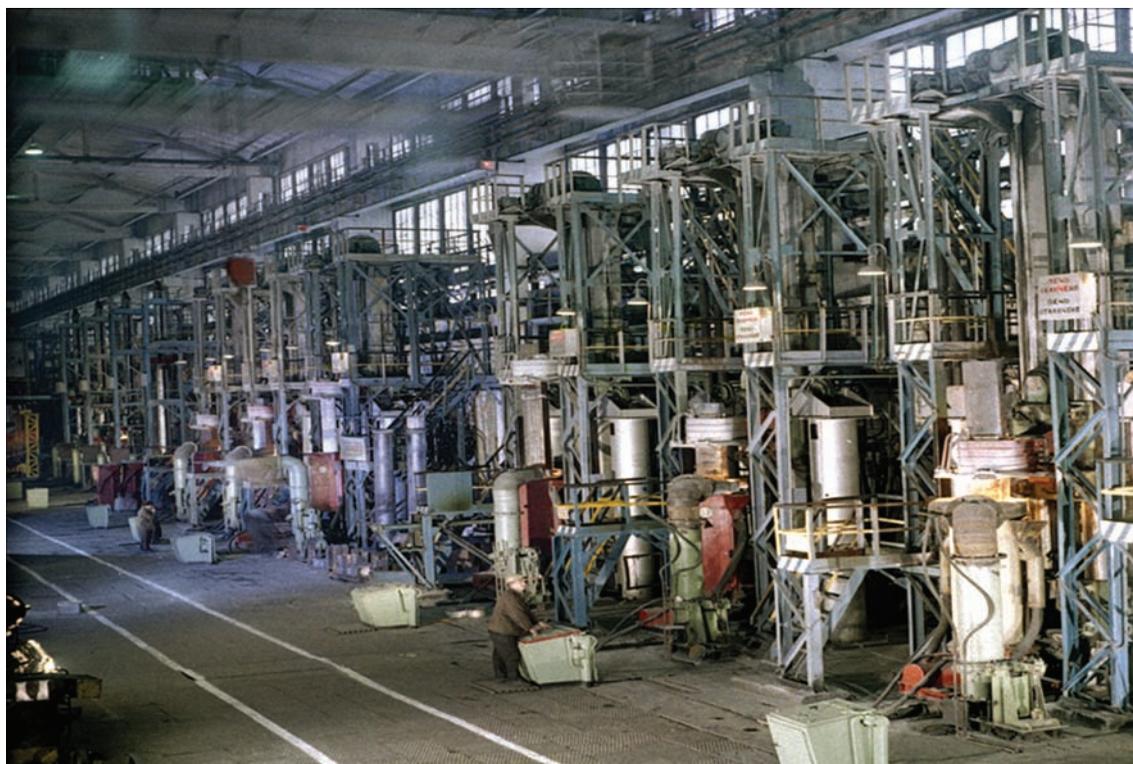


Рис. 11. Отделение сортовых печей ЭШП СПЦ-5



Рис. 12. Первая в мире бифилярная печь ЭШП У-436 для выплавки листовых слитков массой 9...13 т

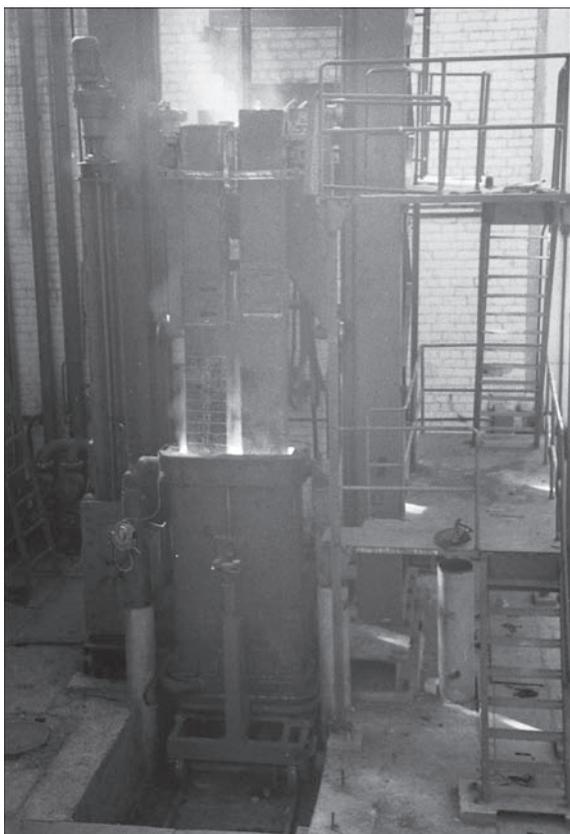


Рис. 13. Первая опытно-промышленная бифилярная печь ЭШП для производства листовых слитков массой 5 т

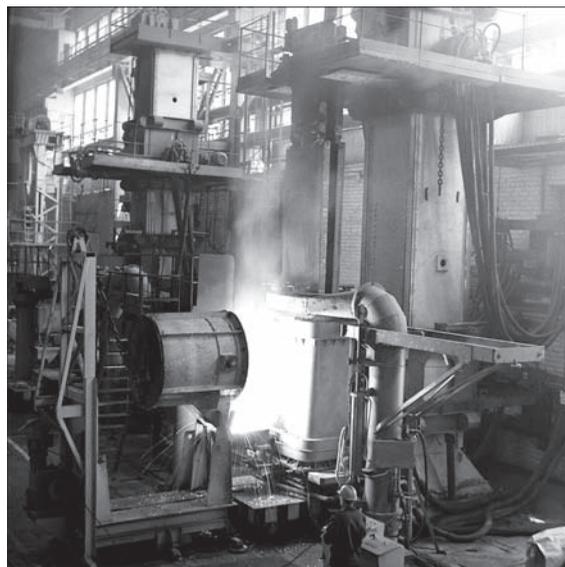


Рис. 14. Заливка шлака сифонным способом на печи ЭШП для выплавки листовых слитков массой 10 т

1500 кг. Переплавливали в них катаные электроды квадрат 180...195 мм. Эти самые кристаллизаторы и электроды к ним были использованы для пуска новых печей в СПЦ-5. А произошло это, без преувеличения можно сказать, историческое для нашего завода событие в начале июля 1966 г. и было достаточно эмоционально описано в статье «Старт цеха-гиганта» спецкора газеты «Индустриальное Запорожье» Т. Гришина, опубликованной 5 июля 1966 г. Цитируем: «2 июля, 12 часов дня. На рабочей площадке начальник цеха С. А. Лейбензон, старший мастер С. С. Казаков, старший электрик цеха Т. М. Бродский. Плавку под руководством мастера Л. В. Фролова готовит сталевар Артур Вяткин и его подручный Николай Ряснов.

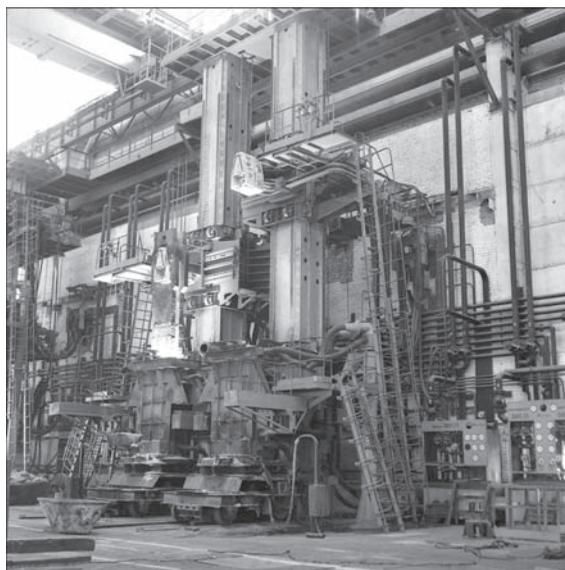


Рис. 15. Печи ЭШП 20 ВГ для получения листовых слитков массой до 20 т

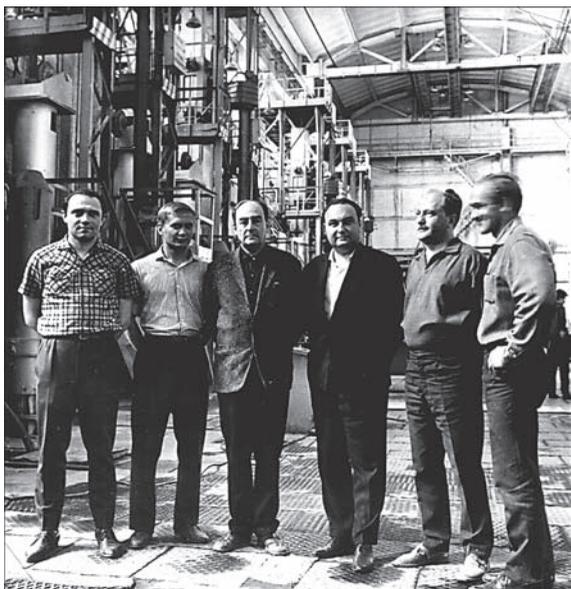


Рис. 16. Ученые ЭШПисты-первопроходцы в СПЦ-5 завода «Днепроспецсталь». Слева направо: Г. П. Кагановский, С. С. Казаков, С. А. Лейбензон, Ю. В. Латаш, В. Д. Кучеров, А. Г. Богаченко, 1965 г.

Следует команда: «Включить печь!». Поворот рукоятки, на световом табло загорается надпись: «Включена». Плавка началась. Собравшиеся поздравляют друг друга с пуском цеха. С лица А. Вяткина не сходит улыбка, он не скрывает своей радости, ведь именно ему посчастливилось вести эту плавку на новом агрегате в новом цехе.

Новый цех-гигант принял старт.

Первые три печи ЭШП (первый блок) начали работать практически одновременно. Акт приемки цеха в эксплуатацию был подписан в министерстве 30 сентября 1966 г. — официальная дата рождения цеха. Второй блок (печи 4–6) был пущен 3 ноября, а седьмая печь ОКБ-1065 (завершение первой очереди цеха) начала плавить металл с 3 декабря 1966 г.»

С пуском основного отделения СПЦ-5 прежний цех первоначально был переименован в СПЦ-6, затем в отделение СПЦ-5 (рис. 11). В этом цехе в



Рис. 17. Лауреаты Государственной премии Украины 1977 г. в области науки и техники. В центре первого ряда Президент Академии наук СССР Б. Е. Патон

1966 г. трехфазные печи ЭШП заменили на более совершенные — однофазные. Руководили цехом в разное время В. П. Акулов и В. И. Положай.

В 1967 г. в СПЦ-5 введены в эксплуатацию две печи ОКБ-1065 (печи 8, 9) и четыре печи ОКБ-905 (печи 10–13). Печи 1–9 предназначены для получения сортовых слитков массой 4,3 т сечением квадрат 565 мм, печи 10–13 — для слитков массой 2,2 т сечением квадрат 415 мм. В том же 1967 г. 22 декабря в цехе впервые в союзе введена в эксплуатацию первая на заводе печь ЭШП У-436 для выплавки листовых слитков массой 10 т (рис. 12). В 1968 г. продолжалось наращивание мощностей по производству листовых слитков ЭШП и были введены еще две печи — У-436 и У-328 (рис. 13, 14). В конце 1968 г., а именно 31 декабря произошло крайне важное событие для развития переплавных процессов на заводе. В СПЦ-1 получена первая отливка на установке полунепрерывной разливки стали (УПНРС). Назначение этой установки — отливка электродов сечением квадрат 370 мм для производства сортовых слитков ЭШП и электродов диаметром 405 мм для ВДП.

Значительным технологическим объектом, введенным в работу в 1974 г., стала листовая печь ЭШП-16ВГ в СПЦ-5. Первую плавку на новой печи проводили 4 сентября. Плавку вел сталевар А. С. Соколов под руководством исполняющего обязанности старшего мастера Л. В. Фролова с участием руководителя группы ЦЗЛ Г. П. Кагановского. Плавка прошла нормально.

В 1976 г. произвели расширение цеха за счет пристройки дополнительного отделения, в котором разместили три сдвоенных листовых электрошлаковых печи для получения слитков массой до 20 т (рис. 15).

Основным потребителем металла ЭШП была оборонная промышленность. За высокие качественные характеристики и пластичность, которую особенно оценили специалисты деформационного передела, металлурги и машиностроители назвали его «ДЕЛИКАТЕСНЫМ».

Сплав науки с производством. Высокие темпы внедрения процесса ЭШП и ввода в эксплуатацию печей потребовали от разработчиков своевременного технологического обеспечения. Промышленной технологии выплавки такого металла не было, да и не могло быть, ведь она разрабатывалась впервые в мире на заводе «Днепроспецсталь». Не все шло гладко, для обеспечения качества слитков «патоновцы» и специалисты институтов, что называется ночевали и дневали непосредственно возле печи и отработывали технологию плавки.



Рис. 18. Слиток из стали X12MФ-Ш диаметром 800 мм и массой 6 т

В числе первых огромный научный вклад в разработку технологии электрошлакового переплава на заводе «Днепропетцсталь» внесли директор завода А. Ф. Трегубенко, кандидаты технических наук С. А. Лейбензон, В. Смоляков, К. С. Ельцов, Е. И. Мошкевич, С. С. Казаков, Г. П. Кагановский, М. С. Вульфович, А. И. Хитрик. От ИЭС им. Е. О. Патона: Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш, А. Г. Богаченко и др. Первые плавки ЭШП проводили сталевары И. Серый, А. Степанов, И. Христин, Н. Меняйло, В. Брацило, А. Синченко, Ю. Гогун и др. В процессе пуска печей и освоении технологии ЭШП участвовали: Л. Фролов, С. Казаков, В. Положай, Г. Бродский, А. Фукс, И. Бакуль, Е. Маркович, А. Константинов, В. Кукула, В. Добровольский, И. Чухлетов, А. Кондрашин, В. Зиновьев, П. Гайчук, В. Сержантов, А. Коломоец.

За освоение и развитие переплавных процессов на заводе «Днепропетцсталь» директору завода А. Ф. Трегубенко присвоено звание лауреата

Таблица 1. Производство стали на заводе «Днепропетцсталь»

Год	Выплавка стали в СПЦ-1, 2, 3, т	Выполнение плана, %	Выплавка стали в СПЦ-5, т
1975	1363775	101,1	102000
1976	1393205	100,7	112000
1977	1392124	101,0	134000
1978	1394416	100,5	142000
1979	1368891	100,0	147000



Рис. 19. Слиток из стали ШХ15СГ-Ш сечением квадрат 565 мм при извлечении из кристаллизатора



Рис. 20. Слитки из стали 08X18N10Т-Ш сечением квадрат 565 мм и массой 4,3 т

Таблица 2. Производство стали способом ЭШП на заводах МЧМ СССР

Год	Рост производства электрошлакового металла*	Количество марок сталей, полученных способом ЭШП	Увеличение максимального развеса слитков ЭШП, т
1958	1	10	0,3
1962	60	36	1,7
1966	—	—	4,0
1968	450	96	—
1969	—	—	13,0
1973	600	141	20,0
1976	900	168	—
1980	2600	185	—
1983	2800	190	40,0

*1958 г. принят за единицу.



Рис. 21. Электрод из стали ЧС82-Ш после приварки инвентаря Ленинской премии. Лауреатами Государственной премии стали директор завода К. С. Ельцов и старший мастер вакуумного отделения цеха И. А. Трегубенко. Звание дважды лауреат Государственной премии УССР и Украины и премии Совета Министров СССР присвоено С. С. Казакову.

В разработке и освоении технологии ЭШП завод сотрудничал с многочисленными научно-исследовательскими институтами как технологического, так и материаловедческого направления. Весьма тесное технологическое сотрудничество было с кафедрой Запорожского машиностроительного института, которую возглавлял коренной днепропетровец Ю. А. Шульте. За участие в разработке технологии ЭШП Ю. А. Шульте присуждена Ленинская премия. Безусловно специалистов, посвятивших свою жизнь процессу ЭШП, намного больше, чем перечислено выше. Некоторые из них представлены на рис. 16, 17.

В табл. 1 показано начало развития производства сталей в СПЦ-5.

Интересные данные приведены в материалах конференции по увеличению объема производства стали, переплавленной способом ЭШП на заводах МЧМ СССР за 25 лет (табл. 2).

С начала освоения производства металла способом ЭШП оформлено около 2000 изобретений, из них у нас в стране — 1500 и получено 90 патентов.

К сожалению происшедшие общественные процессы негативно отразились на производстве стали способом ЭШП. Однако цех находится в



Рис. 22. Слиток из стали ЧС82-Ш сечением квадрат 565 мм при извлечении из кристаллизатора

полной боевой готовности и сегодня производство металла ЭШП продолжается. Коллектив СПЦ-5 совместно со специалистами ЦЗЛ продолжают совершенствовать технологию и осваивать новый марочный сортамент. Разработана, освоена и внедрена без привлечения сторонних организаций технология производства кузнечных слитков ЭШП массой 6 т и диаметром 800 мм из марок сталей Х12МФ-Ш, 13Х11Н2В2МФ-Ш (ЭИ961-Ш), 15Х12Н2МВФАБ-Ш (ЭП517-Ш), 08Х18Н10Т-Ш. СПЦ-5 ЧАО «Днепропетросталь» располагает значительным парком оборудования для ЭШП и производит стальные слитки подшипниковых ШХ15-Ш, ШХ15СГ-Ш, быстрорежущих Р6М5-Ш, конструкционных 12Х2Н4А-Ш, 18Х2Н4МА-Ш, нержавеющей 13Х15Н4АМ3-Ш (ЭП310-Ш), 15Х16Н2АМ-Ш (ЭП479-Ш), коррозионностойких 08Х18Н10Т-Ш, инструментальных 4Х5МФ1С-Ш, 3Х3М3Ф-Ш и других марок сталей массой слитков от 0,8 до 20 т (рис. 18–22). Освоено производство высокобористой марки стали 04Х14Т3Р1Ф-Ш (ЧС 82-Ш) с содержанием бора более 1,5 % для атомной энергетики (рис. 22). Разработаны и внедрены технологии долегирования при ЭШП кремнием и титаном, ЭШП на синтетическом флюсе, который в два раза дешевле фабричного плавного, что повысило конкурентоспособность продукции ЭШП и при этом технология производства проката и поковок из электрошлакового металла завода «Днепропетросталь» соответствует высоким стандартам качества.

*В. Н. Корниевский, А. И. Панченко, С. В. Давидченко, С. С. Казаков, И. Н. Логозинский, А. С. Сальников, А. Г. Федьков, Ю. Н. Рыльский
ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепропетросталь» им. А. Н. Кузьмина»*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНОКУЛЯТОРОВ НА ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛИ X12МФ-Ш

С. В. Давидченко¹, А. И. Панченко¹, И. М. Билоник²,
И. Н. Логозинский¹, А. С. Сальников¹, А. Г. Федьков¹

¹ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь» им. А. Н. Кузьмина».

69008, г. Запорожье, Южное шоссе, 81. E-mail: info@dss.com.ua

²Запорожский национальный технический университет.

69061, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: znu@znu.edu.ua

Исследована дисперсность структуры литой стали X12МФ-Ш, обработанной инокуляторами в процессе выплавки слитка ЭШП диаметром 300 мм. Показано сравнительное строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка стали X12МФ-Ш с введением и без инокуляторов в металлическую ванну. Количественно оценены параметры сетки эвтектических карбидов в зависимости от массовой скорости введения в расплав инокуляторов. Установлено влияние ввода инокуляторов на массовую скорость наплавления слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш и суммарную производительность процесса ЭШП. Библиогр. 7, табл. 1, ил. 8.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; инокуляторы; диспергирование; литая структура; сетка эвтектических карбидов; карбидная неоднородность

Повышение требований потребителей к служебным характеристикам изделий из инструментальных сталей ледебуритного класса вызывает необходимость металлургов разрабатывать и внедрять технологии, позволяющие влиять на измельчение зерна, уменьшение физико-химической и структурной неоднородности литого металла.

Известно, что прочностные свойства ледебуритных сталей улучшаются пропорционально уменьшению размеров зерна и повышению однородности распределения карбидов. Согласно данным [1] при снижении размеров зерна на один балл прочность сталей У12 и Р18 при неизменном распределении карбидов увеличивается на 200...300 МПа. А повышение карбидной неоднородности деформированного металла на один балл вызывает снижение прочности на 15...20 % и вязкости на 30...50 %. Поэтому диспергирование литой структуры необходимо для создания высокой прочности.

Первичные или эвтектические карбиды в ледебуритных сталях распределяются в металлической матрице неравномерно и значительно различаются по размерам и форме. Широкий температурный интервал затвердевания и различие в плотности кристаллизующихся фаз в этих сталях способствуют формированию карбидной неоднородности. В процессе затвердевания по границам зерен твердого раствора образуется аустенито-карбид-

ная эвтектика, морфология которой в значительной мере зависит от скорости кристаллизации. Так, например, в сталях Р6М5Ф3-МП, X12МФ-МП и др., полученных способом порошковой металлургии, вследствие высокой скорости охлаждения ($10^4...10^5$ °C/c) размеры карбидов чрезвычайно мелкие (до 2...3 мкм), а в стали обычного производства или ЭШП 8...20 мкм [1].

Управление затвердеванием металла является важной и актуальной задачей современной специальной электрометаллургии, поскольку именно в период затвердевания происходит формирование структурных зон, сегрегация неметаллических включений, образование ликвационной неоднородности, которые не устраняются на последующих переделах [2].

Согласно данным работы [3] с увеличением переохлаждения Δt скорость зарождения центров кристаллов и их рост увеличивается (рис. 1). Непосредственно вблизи температуры плавления вещества имеется область переохлаждения Δt^1 (интервал метастабильности расплава), в которой скорость зарождения центров кристаллизации равна нулю, а увеличение скорости их образования начинается при определенных показателях переохлаждения. Переохлаждение Δt^2 , при котором начинается рост кристалла, значительно меньше интервала метастабильности Δt^1 расплава при зарождении центров кристаллизации. Это означает,

© С. В. ДАВИДЧЕНКО, А. И. ПАНЧЕНКО, И. М. БИЛОНИК, И. Н. ЛОГОЗИНСКИЙ, А. С. САЛЬНИКОВ, А. Г. ФЕДЬКОВ, 2018

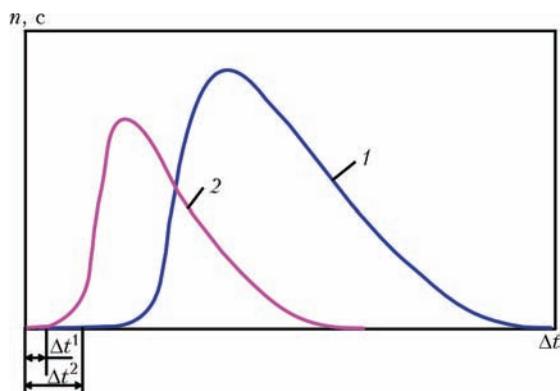


Рис. 1. Зависимости скорости (n) зарождения центров кристаллизации (1) и скорости (c) роста кристаллов (2) от переохлаждения (Δt) расплава

что образование кристалликов на готовой поверхности раздела фаз происходит намного легче, чем зарождение в объеме.

Способность к зародышеобразованию может быть значительно повышена внешним воздействием на параметры кристаллизации металла за счёт создания готовых центров кристаллизации в затвердевающем расплаве [4].

Перспективным направлением улучшения структуры и свойств электрошлакового слитка является введение в расплав инокуляторов (изоморфных микрочастиц-холодильников), которые повышают степень переохлаждения расплава и создают условия для образования мелкодисперсной структуры слитка или отливки [5].

Известны способы воздействия на кристаллическую структуру сплавов, связанные с применением модификаторов из изоморфных кристаллов того же металла [5, 6]. Этому способствует то, что интенсивность зарождения центров кристаллизации резко возрастает при образовании частиц, обладающих структурным сходством с затверде-

вающим сплавом. При этом желательно, чтобы образование продуктов реакции, способствующих образованию центров кристаллизации, происходило одновременно с формированием кристаллизующейся фазы основного металла. Наиболее полно этому условию отвечают обломки кристаллов затвердевающего сплава. Модифицирующее влияние обломков кристаллов затвердевающего сплава обнаружено Г. Ф. Баландиным [5].

В работе [6] установлено, что при электрошлаковой выплавке введение инокуляторов в металлическую ванну слитков диаметром 55 мм от 10 до 25 % повышает механические свойства литых сталей Р6М5 и Х12М в 1,2...1,4 раза. Однако в литературе весьма мало сведений о влиянии ввода изоморфных гранул-инокуляторов в металлическую ванну при ЭШП на структуру промышленных слитков, неизвестны и технико-экономические показатели плавки.

Цель настоящей работы: экспериментальные исследования влияния введения инокуляторов в металлическую ванну в процессе ЭШП на структуру промышленных слитков стали Х12МФ-Ш; выполнение количественной оценки параметров сетки эвтектических карбидов; определение влияния инокуляторов на процесс ЭШП и технико-экономические показатели плавки.

Работу выполняли на ПАО «Днепроспецсталь». Электрошлаковый переплав электродов диаметром 175 мм стали Х12МФ проводили на печи ОКБ 1065 в кристаллизаторе диаметром 300 мм с применением флюса АНФ-6. Ввод гранул инокуляторов в металлическую ванну выполняли в процессе ЭШП дозатором «Доза-4». Дозатор состоит из четырех вращающихся барабанов, оборудованных дозирующими устройствами (питателями) целевого типа, установленных над бункером конической формы, и предназначен для подачи порошкообразных, гранулированных легирующих материалов и раскислителей в металлическую ванну в процессе ЭШП.

Инокуляторы представляли собой изоморфные гранулы стали Х12МФ диаметром 0,8...1,2 мм, изготовленные распылением расплава азотом по технологии цеха порошковой металлургии завода «Днепроспецсталь». Качество гранул соответствовало требованиям для изготовления пресовок. Характерной особенностью инокуляторов является их мелкодисперсная структура (рис. 2), а также низкое содержание неметаллических включений, что обеспечивается способом производства и высокой скоростью кристаллизации при получении гранул.

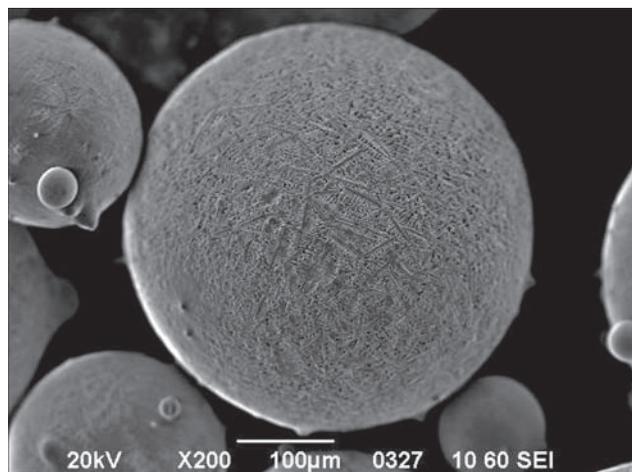


Рис. 2. Дендритная структура гранул инокуляторов стали Х12МФ

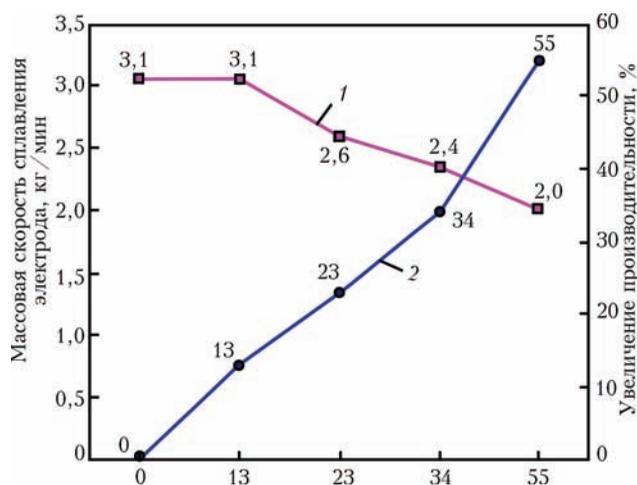


Рис. 3. Влияние ввода инокуляторов на массовую скорость сплавления электрода (1) слитка диаметром 300 мм стали X12MФ-Ш и суммарную производительность (2) процесса ЭШП

Опытную работу проводили согласно требованиям заводских технологических инструкций по следующей схеме:

исходный металл для ЭШП стали X12MФ выплавляли в 50-тонных электродуговых печах с обработкой на УПК и разливкой в слитки развесом 1,0 т. Затем предварительно отожженные слитки ковали в кузнечном цехе на электроды диаметром по 175 мм;

электрошлаковый переплав электродов диаметром 175 мм выполняли по стандартным электрическим режимам в соответствии с требованиями действующей технологии. В процессе ЭШП выполнили пять вариантов введения инокуляторов по расчету от массовой скорости сплавления электрода, %: 0 (стандартная технология), 10, 20, 30, и 50. Фактически при выплавке опытных слитков инокуляторов было внесено несколько больше. По второму варианту — 16,8 кг (13 %); третьему — 29,7 кг (23 %); четвертому — 43,6 кг (34 %); пятому — 70,4 кг (55 %);

линейную скорость сплавления электрода по каждому варианту фиксировали с помощью электронного устройства контроля скорости сплавления электрода ЛМ. 1790-1 РЭ разработки ПАО «Днепропетсталь», а также по каждому варианту фиксировали глубину металлической ванны забросом вольфрамовой крупки. Процесс ЭШП опытных вариантов проходил стабильно, без отклонений от заданного режима плавления. При внесении в металлическую ванну порядка 60 % инокуляторов от массовой скорости сплавления электрода зафиксированы броски рабочего тока до 1 кА с переходом плавки в нестабильный режим.

По результатам проведенных плавки установлено, что с увеличением расхода вводимых ино-



Рис. 4. Слиток ЭШП стали X12MФ-Ш диаметром 300 мм, выплавленный с введением инокуляторов в процессе ЭШП куляторов массовая скорость сплавления электрода снижается с 3,1 до 2,0 кг/мин, т. е. на 32 %. В то же время суммарная производительность процесса ЭШП за счет добавления инокуляторов увеличивается от 13 до 55 % (рис. 3). Расход электроэнергии с учетом массы добавленных гранул уменьшился на 8...16 % и находился в пределах 1345...1470 кВт·ч/т. При выплавке слитка диаметром 300 мм и массой 1,0 т средний расход электроэнергии по стандартной технологии составлял 1600 кВт·ч/т.

Один из опытных слитков представлен на рис. 4, из которого видно, что его поверхность гладкая, гофры и пережимы отсутствуют.

Исследования макроструктуры проводили на продольных темплетях, вырезанных по оси



Рис. 5. Макроструктура и глубина металлической ванны слитка диаметром 300 мм стали X12MФ-Ш, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант выплавки)



Рис. 6. Макроструктура с глубиной усадочной раковины 20 мм головной части слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант выплавки)

слитка. Макроструктуру получили плотную, однородную, без дефектов ликвационного характера (рис. 5). На рис. 6 представлен макротемплет с усадкой по пятому варианту переплава. Видно, что дефектов усадочного характера нет, высота усадочной раковины от торца слитка 20 мм (по массе 15 кг). Ниже усадки макроструктура в слитке, полученном с введением инокуляторов, плотная и однородная. По стандартной технологии величина головной обреза составляет по высоте слитка 90 мм (50 кг). Это дает основание и возможность снижения головной обреза на 20...30 кг (от 40 до 60 %) [7]. Действие инокуляторов положительно сказалось на глубине металлической ванны. Глубина зафиксированной металлической ванны в осевой части слитка по пятому варианту выплавки составила 80 мм (рис. 5), что в 1,5 раза меньше глубины ванны в слитке, получаемом по действующей технологии.

Образцы для количественной оценки параметров сетки эвтектических карбидов отбирали из центра, на половине радиуса и от края слитков по каждому варианту выплавки. Оценка изменения

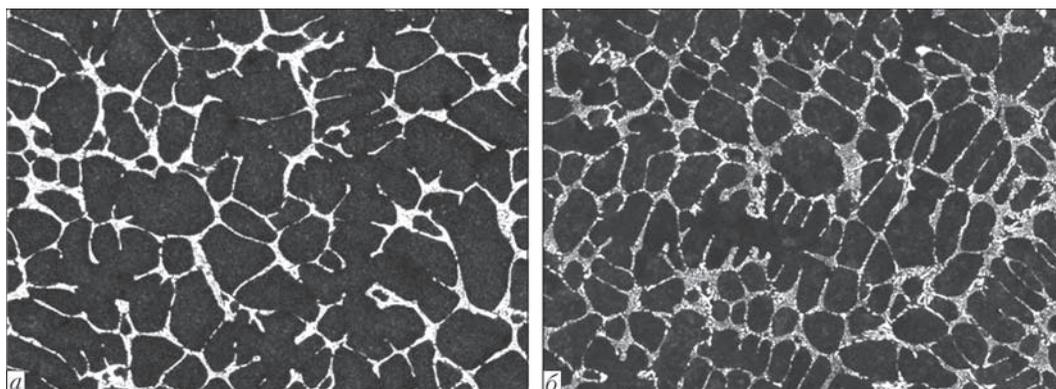


Рис. 7. Строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш: а — без введения инокуляторов; б — с введением 55 % инокуляторов, $\times 50$

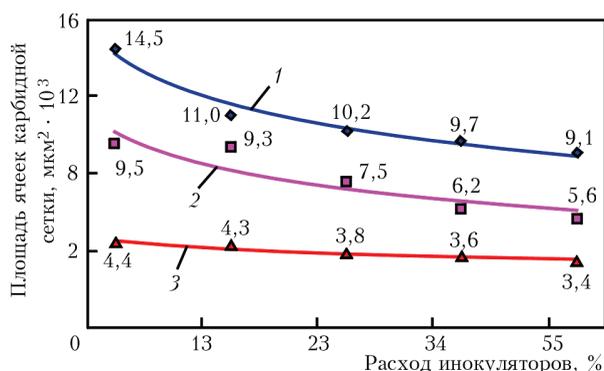


Рис. 8. Изменение площади ячеек карбидной сетки в слитке диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш в зависимости от количества инокуляторов (1 — центр; 2 — 1/2R; 3 — край), вводимых в жидкую металлическую ванну при ЭШП

параметров сетки эвтектических карбидов проводили с использованием компьютерной металлографии — программно-аппаратного комплекса «ВидеоТест-Металл» на базе оптического микроскопа «ZEISS Axiovert 200MAT» при 50-кратном увеличении.

Химический состав определяли спектральным методом. Полученные данные приведены в таблице. Установлено, что изменение химического состава стали X12МФ при ЭШП с вводом инокуляторов аналогичны изменениям при переплаве по стандартной заводской технологии. Химический состав полученного металла ЭШП соответствует требованиям ТУ ДСС 003, гармонизированным с зарубежными стандартами на поставку продукции на экспорт.

В результате количественных металлографических исследований установлено, что наибольший эффект диспергирования литой структуры слитка диаметром 300 мм достигнут при вводе в металлическую ванну 55 % инокуляторов от массовой скорости сплавления расходуемого электрода (рис. 7). В частности, площадь ячеек эвтектических карбидов в среднем уменьшилась в центре слитка на 37 %, в области половины радиуса — на

Химический состав стали X12МФ (расходуемых электродов, инокуляторов) и слитка стали X12МФ-Ш, мас. %									
Объект исследований	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Al
Расходуемый электрод	1,54	0,26	0,32	0,025	0,005	11,21	0,74	0,96	0,028
Инокуляторы	1,50	0,27	0,36	0,027	0,012	11,15	0,75	0,95	0,030
Металл ЭШП	1,57	0,26	0,28	0,025	0,003	11,17	0,74	0,93	0,013
Требования ТУ ДСС 003	1,50	0,15	0,10	не более	не более	11,00	0,70	0,70	—
(DIN EN ISO 4957)	1,60	0,45	0,40	0,030	0,015	13,00	1,00	1,00	—

41 %, в краевой зоне — на 22 % по сравнению со структурой серийного слитка (рис. 8).

Воздействие инокуляторов на диспергирование литой структуры в большей степени проявляется в центре и на половине радиуса слитка.

Уменьшение средней площади ячеек в зависимости от расхода инокуляторов в центре слитка составило от 24 до 37 %, на половине радиуса — от 2 до 41 %, в краевой зоне — от 2 до 22 % (см. рис. 8).

Ввод инокуляторов в количестве 13 % оказывает наименьшее влияние на уменьшение ячеек карбидов. В центре слитка площадь ячеек уменьшилась на 24 %, на половине радиуса и в краевой зоне — на 2 %.

Ввод инокуляторов в количестве 13 и 23 % оказывает менее эффективное воздействие на размеры сетки эвтектических карбидов (в сравнении с 55 %) и уменьшает площадь ячеек в центре слитка на 29...33 %, в области половины радиуса — на 21...34 % и в краевой зоне — на 13...18 %.

Эффект от ЭШП с инокуляторами (уменьшение размера ячеек) в краевой зоне наименьший. Это объясняется соизмеримым диспергирующим действием существующей системы охлаждения на периферию слитка.

Таким образом, в результате проведенной работы для слитка диаметром 300 мм стали X12МФ-Ш установлено, что введение в металлическую ванну в процессе ЭШП изоморфных гранул инокуляторов обеспечивает:

измельчение ячеек эвтектической сетки на 41 % (максимальное);

уменьшение глубины металлической ванны в 1,5 раза;

возможность снижения головной обрезки на 40...60 %;

экономии электроэнергии от 8 до 16 %.

Полученные результаты целесообразно использовать для решения важной практической

задачи — разработки промышленной технологии электрошлакового переплава с вводом инокуляторов, обеспечивающей как улучшение структуры литого металла и соответственно качественных характеристик поковок и проката, так и повышение технико-экономических показателей плавки.

Список литературы

1. Геллер Ю. А. (1983) *Инструментальные стали*. Москва, Металлургия.
2. Патон Б. Е., Лакомский В. И., Григоренко Г. М., Медовар Л. Б. (2003) Специальная электрометаллургия: полвека в действии. Что дальше? *Современная электрометаллургия*, 4, 3–7.
3. Баландин Г. Ф. (1965) *Формирование кристаллического строения отливок*. Москва, Машиностроение.
4. Голубцов В. А., Лунев В. В. (2009) *Модифицирование стали для отливок и слитков*. Запорожье, ЗНТУ.
5. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М. (1990) *Качество электрошлакового металла*. Киев, Наукова думка.
6. Попов В. С., Билоник И. М., Бережный С. П., Капустян А. Е. (2004) Улучшение структуры и свойств литых инструментальных сталей при электрошлаковой выплавке с инокуляторами. *Современная электрометаллургия*, 2, 8–9.
7. Попов В. С., Билоник И. М., Давиденко С. В., Панченко А. И., Логозинский И. Н., Сальников А. С., Зыков И. Ю. (2007) *Способ получения слитка электрошлаковым переплавом*, Украина, Пат. 28530.

References

1. Geller, Yu.A. (1983) *Tool steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Grigorenko, G.M., Medovar, L.B. (2003) Special electrometallurgy: Half a century of activity. What next? *Advances in Electrometallurgy*, 4, 2–6.
3. Balandin, G.F. (1965) *Formation of crystalline structure of castings*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Golubtsov, V.A., Lunev, V.V. (2009) *Modification of steel for castings and ingots*. Zaporoshie, ZNTU [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Dyachenko, D.M. (1990) *Quality of electroslag metal*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Popov, V.S., Bilonik, I.M., Berezhny, S.P. and Kapustyan, A.E. (2004) Improvement of structure and properties of cast tool steels in electroslag melting with inoculators. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 7–8.
7. Popov, V.S., Bilonik, I.M., Davidchenko, S.V. et al. (2007) *Method of production of ingot by electroslag remelting*. Pat. 28530, Ukraine [in Russian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНОКУЛЯТОРІВ НА ДИСПЕРГУВАННЯ ЛИТОЇ СТРУКТУРИ СТАЛІ Х12МФ-Ш

С. В. Давидченко¹, О. І. Панченко¹, І. М. Білонік², І. М. Логозинський¹, А. С. Сальніков¹, О. Г. Федьков¹

¹ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А. М. Кузьміна».

69008, м. Запоріжжя, Південне шосе, 81. E-mail: info@dss.com.ua

²Запорізький національний технічний університет.

69061, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: znu@znu.edu.ua

Досліджено дисперсність структури литої сталі Х12МФ-Ш, обробленої інокуляторами в процесі виплавки зливка ЕШП діаметром 300 мм. Показано порівняння будови сітки евтектичних карбідів осьової частини зливка сталі Х12МФ-Ш з введенням і без інокуляторів в металеву ванну. Кількісно оцінено параметри сітки евтектичних карбідів в залежності від масової швидкості введення в розплав інокуляторів. Встановлено вплив введення інокуляторів на масову швидкість наплавлення зливка діаметром 300 мм сталі Х12МФ-Ш і сумарну продуктивність процесу ЕШП. Бібліогр. 7, табл. 1, іл. 8.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; інокулятори; диспергування; лита структура; сітка евтектичних карбідів; карбідна неоднорідність

INVESTIGATION OF EFFECT OF INOCULATORS ON DISPERSION OF STEEL Kh12MF-Sh CAST STRUCTURE

S.V. Davidchenko¹, A.I. Panchenko¹, I.M. Bilonik², I.N. Logozinsky¹, A.S. Salnikov¹, A.G. Fedkov¹

¹PJSC «A.N. Kuzmin Electrometallurgical plant «Dneprospestal».

81 Yuzhnoye shosse, 69008, Zaporozhye. E-mail: info@dss.com.ua

²Zaporozhye National Technical University.

64 Zhukovsky Str., 69061, Zaporozhye. E-mail: znu@znu.edu.ua

Dispersion of structure of cast steel Kh12MF-Sh, treated by inoculators in the process of melting the ESR ingot of 300 mm diameter was investigated. The comparative structure of network of eutectic carbides of an axial part of Kh12MF-Sh steel ingot with and without adding of inoculators to a metal pool is shown. Parameters of network of eutectic carbides were evaluated quantitatively depending on mass rate of adding inoculators into the melt. The effect of adding inoculators on mass rate of deposition of 300 mm diameter ingot of steel Kh12MF-Sh and total efficiency of the ERS process was established. Ref. 7, Tabl. 1, Fig. 8.

Key words: electroslag remelting; inoculators; dispersion; cast structure; network of eutectic carbides; carbide heterogeneity

Поступила 05.03.2018

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»**





**Міжнародна конференція
«ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»**

**Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України**

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ
Голова:
академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали

- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУПНЫХ СЛЯБОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ПЕРЕПЛАВОМ

Чжоу-хуа Цзян¹, Сю Чень¹, Синь Ген¹, Цян Ю²

¹Факультет материаловедения и металлургии, Северо-Восточный университет.

²Факультет информатики и инженерии, Северо-Восточный университет.

Уеньхуа, район Хепин, Шеньян, Ляонин, 110819, КНР. E-mail: jiangzh63@163.com

Разработаны и построены три типа печей для электрошлакового переплава с целью получения слябов весом 50 т с максимальным поперечным сечением 960×2000 мм. Налажено производство слябов из более 20 марок сталей толщинами 640, 760 и 960 мм, а также пластин толщиной от 20 до 410 мм. Представлены основные особенности печей ЭШП, технология процесса, свойства слябов и сверхтолстых плит ЭШП, применяемых для гидроэлектростанций. Для ЭШП применяли низкочастотный источник питания, бифилярное соединение, подвижной кристаллизатор, защитные газы, вторичное охлаждение, регулирование скорости плавления и другие передовые технологии. Низкое содержание водорода, кислорода и включений, а также хорошее качество слитка ЭШП получены за счет оптимизации технологического процесса. В качестве образца из сверхтолстых плит, применяемых для гидроэлектростанций, получены толстые пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм. Библиогр. 7, табл. 12, ил. 8.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; крупный сляб; сверхтолстая плита; сталь для гидроэнергетики; свойства; Z-направление

Введение. По мере развития индустрии производства оборудования быстро растет спрос на сверхтолстые плиты высокого качества [1]. Например, толщина пластины из высококачественной штамповой, котельной стали и стали, используемой в технике для освоения океана, ядерной энергетике и гидроэнергетике, превышает 150 и даже 400 мм. Сляб, полученный с помощью непрерывного литья, не может удовлетворить требованиям, предъявляемым к данной толщине. Более того, внутреннее качество сляба толщиной более 350 мм трудно контролировать. Несмотря на то, что при получении слитков с помощью литья в формы, требования относительно их толщины выполнить можно, однако низкое качество литья не соответствует требованиям, предъявляемым к толстой пластине высокого качества. Это, например, касается свойств в Z-направлении. Превосходство крупного сляба, полученного электрошлаковым переплавом (ЭШП), можно характеризовать следующими особенностями:

высокая чистота, мелкозернистая структура, стабильность химического состава, хорошие пластические свойства при обработке в широком диапазоне температур и возможность получения более тонких листов при прокатке. Например, сляб ЭШП толщиной 700 мм может быть переработан в пластину толщиной 350 мм;

с помощью тяжелого прокатного стана крупные слябы ЭШП могут быть прокатаны в пластины, что позволяет исключить процесс обжатия и,

таким образом, сократить потребление энергии и сэкономить рабочее время;

пластины, прокатанные из слитка ЭШП, имеют отличные свойства по сравнению с обычными. У них значительно улучшены пластичность по поперечному сечению, вязкость, а также анизотропия, вязкость разрушения, чувствительность к надрезу и показатель малоциклового усталости;

стальная пластина ЭШП обладает отличной свариваемостью. Послесварочная обработка нормализацией крупных сварных конструкций (сосудов высокого давления, котлов, корпусов реакторов) способствует получению меньшей зоны термического влияния при сварке;

стальная пластина ЭШП имеет хорошую устойчивость к хладноломкости при низкой температуре;

изделия, изготовленные из сверхтолстого сляба ЭШП, хорошего качества, а высокая текучесть, увеличивающаяся на 9...18 % по сравнению с литьем в формы, достаточна для того, чтобы компенсировать расходы на переплав. Более того, реальные производственные затраты можно сократить благодаря исключению процесса обжатия.

Три типа печей ЭШП для изготовления слябов весом 50 т с максимальным поперечным сечением 960×2000 мм разработаны и построены в сотрудничестве Северо-Восточного университета с компанией Wuyang iron and steel Co Ltd [2]. С 2007 г. налажено производство слябов ЭШП из марок сталей P20, WSM718R, 2,25Cr1Mo, 16MnR (HIC), S355J2 + N-Z35 и 20MnNiMo толщиной 640, 760 и

960 мм и готовых пластин от 20 до 410 мм. В этой статье представлены основные характеристики печей ЭШП, технологии процесса, металлургические характеристики слябов и свойства сверхтолстых плит, применяемых для гидроэлектростанций.

50-тонная печь ЭШП для изготовления крупных слябов. Для данных трех печей ЭШП были использованы низкочастотный источник питания, бифилярное соединение электродов, подъем кристаллизатора, защитные газы, вторичное охлаждение, регулирование скорости плавления электродов и другие современные технологии.

Низкочастотный источник питания. Для работы печи использовали трансформатор с трехфазным выпрямителем напряжением 35 кВ на вторичной обмотке. При этом трехфазный переменный ток преобразовывается в однофазный низкочастотный величиной 0,1...5 Гц, благодаря чему удается обеспечить равномерную нагрузку на трехфазную сеть. Это первый случай применения низкочастотного источника питания в крупной печи ЭШП отечественного производства, который позволяет значительно сэкономить электроэнергию.

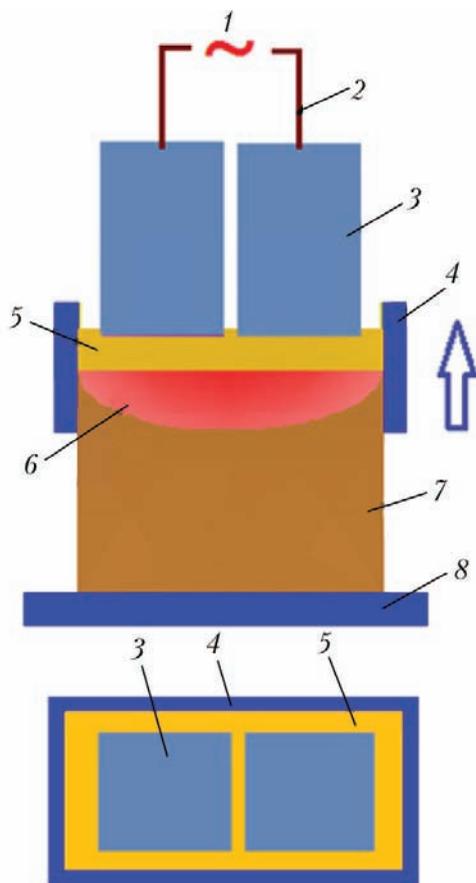


Рис. 1. Принципиальная схема 50-тонной печи ЭШП для производства крупного сляба: 1 — низкочастотный источник питания; 2 — контур первичной цепи; 3 — плавящийся электрод; 4 — кристаллизатор; 5 — расплавленный шлак; 6 — жидкая ванна металла; 7 — слиток; 8 — поддон

Бифилярное соединение электродов. Бифилярное соединение электродов приводит к уменьшению индуктивного сопротивления высоковольтного контура и увеличению коэффициента мощности, что значительно снижает энергопотребление, в результате чего при той же глубине жидкой ванны металла можно достичь более высокой скорости плавки.

Система извлечения слитка. Благодаря системе извлечения слитка из кристаллизатора с закрепленным поддоном и подъемом кристаллизатора, которая состоит из колонн и привода, можно значительно уменьшить высоту кристаллизатора, а также общую высоту печи.

Контроль точности взвешивания электродов и скорости плавки. Используя четыре точных датчика нагрузки и вторичный прибор, измерение массы плавящегося электрода можно провести в режиме онлайн. Скорость плавления электрода можно точно контролировать, чтобы обеспечить качество затвердевания металла с помощью регулировки тока и напряжения в реальном времени.

Защита сухим воздухом. Сухой воздух с точкой росы $-70...-40$ °С использовали для защиты поверхности шлаковой ванны, чтобы значительно снизить накопление водорода в стальном слитке во время процесса переплава и улучшить качество пластин.

Вторичное охлаждение. Вторичное охлаждение осуществляли путем продувки сжатым воздухом поверхности сляба с нижней части кристаллизатора, чтобы ускорить затвердевание стали. Это позволяет улучшить условия затвердевания сляба.

Технология процесса ЭШП для изготовления крупных 50-тонных слябов. На рис. 1 показана принципиальная схема печи ЭШП для производства крупных 50-тонных слябов. Ее принцип работы заключается в том, что низкочастотный источник питания (0,1...5 Гц) обеспечивает электрические параметры (напряжение и ток), необходимые для процесса. При этом ток проходит по схеме электрод–шлаковая ванна–электрод и возвращается к низкочастотному источнику питания. Прямоугольный кристаллизатор размещается на поддоне, а два электрода вводятся в него параллельно так, что торцы электродов располагаются на расстоянии около 50 мм от поверхности поддона. Затем включается источник питания. Когда шлак, расплавленный в отдельной емкости, заливается в кристаллизатор, два электрода соединяются, образуя общий электрический контур. При увеличении тока, проходящего через ванну шлака, температура шлака повышается, электроды начинают плавиться и расплавленный металл постепенно затвердевает в кристаллизаторе. Когда высота слитка достигает 400...500 мм, кристалли-

Таблица 1. Состав шлака, мас. %

Шлак	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO
S1 (CAF3)	40	30	30	—	—
S2	35	20	20	15	10
S3	40	30	20	7	3
S4	50	25	18	5	2
S5 (АНФ-6)	70	30	—	—	—

затор начинает двигаться вверх со скоростью, которая должна совпадать со скоростью плавления электрода, чтобы поддерживать уровень расплавленного металла стабильным. Благодаря четырем датчикам нагрузки Меттлера Толодо для измерения массы электрода в реальном времени и расчета скорости его плавления, скорость плавления можно контролировать за счет регулирования мощности, подводимой к шлаковой ванне.

Металлургический контроль качества крупных слябов ЭШП. Влияние шлака на качество поверхности сляба ЭШП. Во время процесса ЭШП шлак выполняет функции нагрева, рафинирования и формирования расплавленного металла. Поэтому необходимо, чтобы шлак характеризовался и соответствующими свойствами, такими как проводимость, температура плавления и вязкость [3]. При плавке с относительным перемещением кристаллизатора и слитка изменение вязкости шлака в зависимости от температуры должно быть плавным, что соответствует свойствам «длинных шлаков». Аналогичные требования предъявляются и к шлакам, используемым при непрерывном литье. Соответствующие исследования показывают, что многокомпонентная система шлака способствует улучшению показателей вязкости, особенно для шлаков, содержащих SiO₂. Поэтому в этом исследовании разработаны три вида пятикомпонентного шлака (S2, S3, S4) и их свойства сопоставлены с обычными системами шлаков S1 (CAF3) и S5 (АНФ-6) (табл. 1). Интервал плавления и вязкость пяти систем шлаков показаны в табл. 2 и на рис. 2 [4].

Как показано в табл. 2 температура плавления (размягчения) четырех шлаков S1, S2, S3, S4 ниже, чем у шлака АНФ-6, что позволяет выполнить требование относительно того, что температура плавления шлака ЭШП должна быть на 100...200 °С ниже температуры плавления металла. Начальная температура плавления (размягчения), температура образования капли и ее растекания у шлаков S3 и S4 очень близки друг к другу, откуда следует, что их состав близок к составу эвтектики и стабилен. Кроме того, шлак S2 полностью расплавляется при более высоких температурах из-за своей повышенной температуры растекания.

Высокотемпературная вязкость четырех шлаков близка друг к другу и ниже, чем у шлака

Таблица 2. Результаты исследования температуры плавления для разных шлаков

Шлак	Температура размягчения, °С	Температура образования капли, °С	Температура растекания капли, °С
S1	1210	1385	1401
S2	1205	1235	1390
S3	1191	1242	1278
S4	1211	1256	1271
АНФ-6	1395	1403	1438

АНФ-6 (рис. 2). За исключением шлака S1, вязкость других трех медленно снижается в зависимости от температуры и это доказывает, что эти шлаки подходят для процесса ЭШП при получении крупного сляба. Точка резкого перегиба на кривой вязкости шлака S2 отсутствует. Поскольку содержание SiO₂ в шлаке S2 самое высокое, то он относится к «длинному шлаку», что благоприятно сказывается на качестве поверхности крупного сляба, полученного в процессе ЭШП.

На рис. 3 показано, что электропроводность пяти шлаков рассчитана в соответствии с эмпирическим выражением [5]. Результаты расчетов показывают, что электропроводность четырех шлаков ниже, чем у АНФ-6, и уменьшается при снижении содержания CaF₂. С другой стороны, эффективная теплопроводность корки шлака увеличивается при снижении содержания CaF₂ [6]. В результате, шлак с низким содержанием CaF₂ может снизить максимальную глубину высокотемпературной зоны шлака и его расход, а также уменьшить радиальные потери тепла, чтобы значительно снизить расход энергии, затраты и повысить производительность.

Исходя из требований к качеству поверхности крупного сляба ЭШП, шлаковые системы S3 и S4 являются пригодными для получения крупного сляба, поскольку точка плавления (размягчения) и вязкость этих шлаков относительно низкие. На рис. 4 пред-

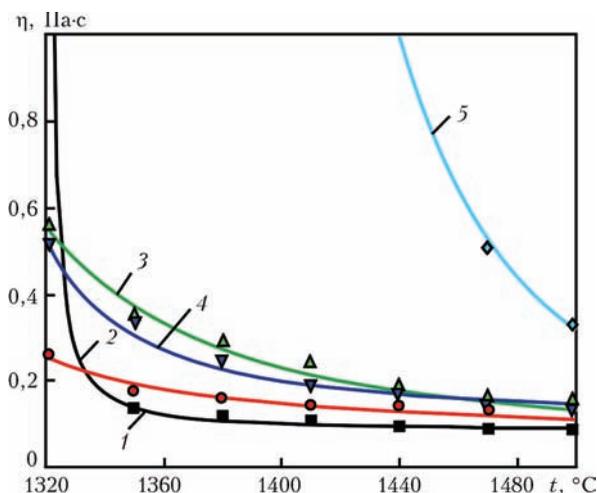


Рис. 2. Изменение вязкости различных шлаков в зависимости от температуры: 1 — S1; 2 — S2; 3 — S3; 4 — S4; 5 — АНФ-6

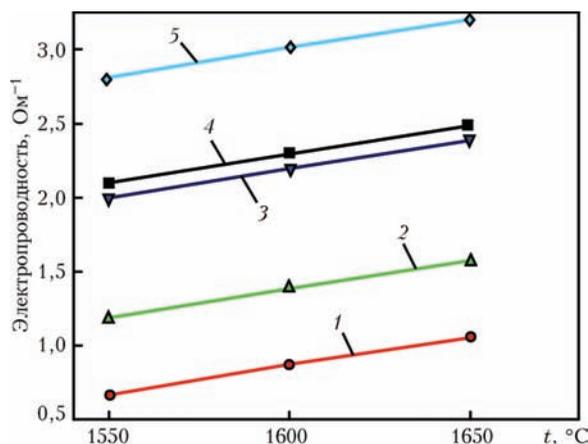


Рис. 3. Электропроводность различных шлаков: 1 — S2; 2 — S3; 3 — S4; 4 — S1; 5 — АНФ-6

ставлен сляб ЭШП, полученный с использованием шлака S3, из которого видно, что качество поверхности сляба хорошее и без дефектов, таких как образование наплывов металла, гофрирование, следы от проливов шлака и т. д.

Контроль водорода во время процесса переплава. Крупный слиток ЭШП очень чувствителен к водороду. Когда его содержание превышает определенное значение, сразу происходит образование большого количества дефектов. Большое количество дефектов обнаружили после прокатки, которые образовались в результате длительного процесса ЭШП крупного слитка. Переплав 50-тонного сляба длился 42 ч, что вызвало насыщение водородом расплавленной стали через шлак. Для того, чтобы снизить содержание водорода в стали приняты следующие меры:

использовали защитный кожух с сухим воздухом, который расположен на расстоянии 600 мм над кристаллизатором, а зазор между днищем защитного кожуха и верхним фланцем кристаллизатора устранили с помощью уплотнительного кольца. Существующие 68 сопел для подачи газа



Рис. 4. Слябы ЭШП размерами, мм: 950×2000×2800 (а), 750×2000×2760 (б)

Таблица 3. Проницаемость водорода в различных шлаках, $\times 10^{-6}$ моль·см⁻¹·мин⁻¹

Шлак	АНФ-6	S3	S4
Проницаемость водорода	0,48	2,18	2,388

диаметром 22 мм и углом наклона 75° устанавливают вокруг стенки кристаллизатора и над его верхним фланцем на высоте 128 мм. Влажность и скорость подачи сухого воздуха контролировали на отметке -50 °C ниже точки росы и 300 м³/ч соответственно;

шлак с низкой проницаемостью водорода также может использоваться для снижения содержания водорода. Хорошо известно, что CaO повышает проницаемость шлака, тогда как SiO₂ снижает. В нашей лаборатории была измерена проницаемость водорода нескольких шлаков (табл. 3) [7]. Проницаемость АНФ-6 без CaO самая низкая, но этот шлак не пригоден в случае относительного перемещения кристаллизатора и слитка. Проницаемость шлака S3 значительно ниже, чем у других, поэтому для ЭШП большого сляба выбрали шлак S3 с низкой проницаемостью водорода;

для предотвращения поглощения влаги компонентами флюса, особенно известью, применяли предварительно расплавленный шлак;

комбинация горячего старта с добавлением твердого шлака — это метод, который не только контролирует содержание водорода, но и помогает избежать трудности при затвердевании шлака. В случае бифилярного соединения электродов очень трудно начать процесс при использовании твердого шлака (холодный старт). Жидкий шлак легко впитывает влагу из воздуха во время заливки его в кристаллизатор из ковша, в результате чего в стали накапливается водород. Для решения этой проблемы применяли сухой воздух и заменяли часть жидкого шлака твердым. На практике 40 % жидкого шлака достаточно для формирования электрического контура между двумя электродами и нагревания шлака, а оставшиеся 60 % — это флюс, который должен быть добавлен после заливки шлака.

Контроль кислорода и неметаллических включений в слябе ЭШП. Кислород в слиток поступает в основном из плавящегося электрода, железной окалины, образующейся на поверхности электрода, нестабильных оксидов в шлаке и атмосферы во время процесса ЭШП. Для эффективного контроля содержания кислорода в слитке это следует учитывать.

В плавящемся электроде необходимо контролировать низкое исходное содержание кислорода. Для получения чистой стали применяют процесс EAF-

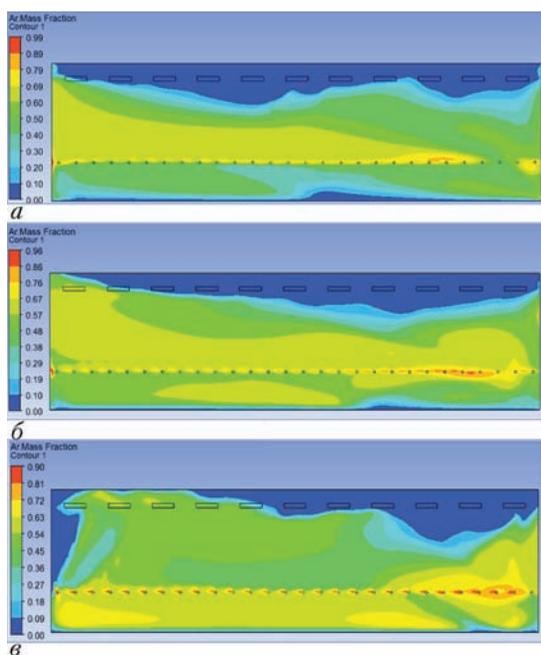


Рис. 5. Область концентрации аргона между электродом и камерой при разных углах наклона сопла, °С: а — 45; б — 60; в — 75

LF–VD–CC. Например, в слябе для гидроэлектростанций, полученном непрерывным литьем, содержание кислорода можно стабильно получать на требуемом уровне.

С помощью шлифования удаляют железную окалину, оставшуюся на поверхности электрода при получении сляба непрерывным литьем. Нестабильные оксиды в компонентах шлака, такие как FeO , Cr_2O_3 , MnO , SiO_2 и т.д., должны контролироваться в соответствии с их допустимыми значениями для разных марок сталей и во время переплава в шлаковую ванну необходимо добавлять умеренное количество раскислителя. Из-за определенного количества SiO_2 , содержащегося в шлаке, используемом в процессе ЭШП, при завершении плавки в шлак необходимо добавить больше CaO , чтобы снизить активность SiO_2 и обеспечить бинарную основность (CaO/SiO_2), составляющую более 3...5.

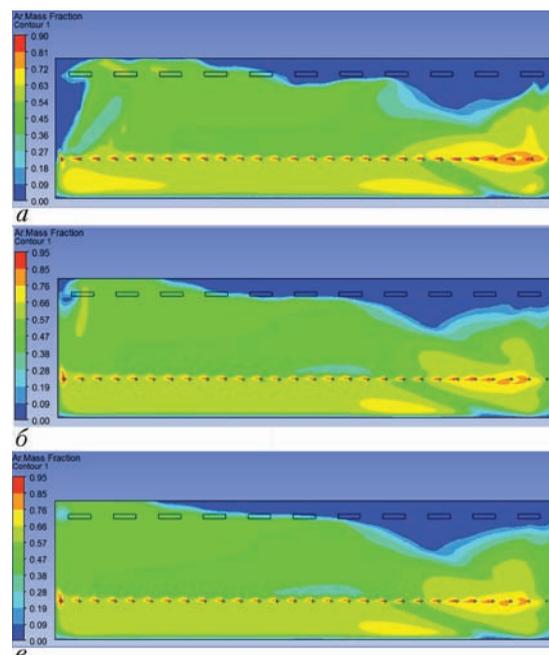


Рис. 6. Область концентрации аргона между электродом и камерой при разных скоростях расхода, м³/ч: а — 60; б — 80; в — 100

Чтобы в дальнейшем предотвратить окислительные поверхности электрода в процессе ЭШП, для контроля кислорода в атмосфере использовали инертный газ (Ar , N_2). Для оптимизации процесса продувки аргоном применяли программное обеспечение FLUENT, позволяющее имитировать поле потока и концентрации газа (Ar) во всей защитной камере над шлаковой ванной с учетом разного угла продувки. В результате моделирования угол сопла и скорость потока составляют 75 и 80 м³/ч соответственно (рис. 5, 6).

Контроль процесса затвердевания слитка ЭШП. Обоснованная скорость плавления необходима не только для обеспечения мелкой ванны жидкого металла, но и для предотвращения очевидных дефектов поверхности при затвердевании. Из-за сильного охлаждения поддоном скорость плавления в начале может быть относительно высокой, тогда как она должна быть ниже из-за эф-

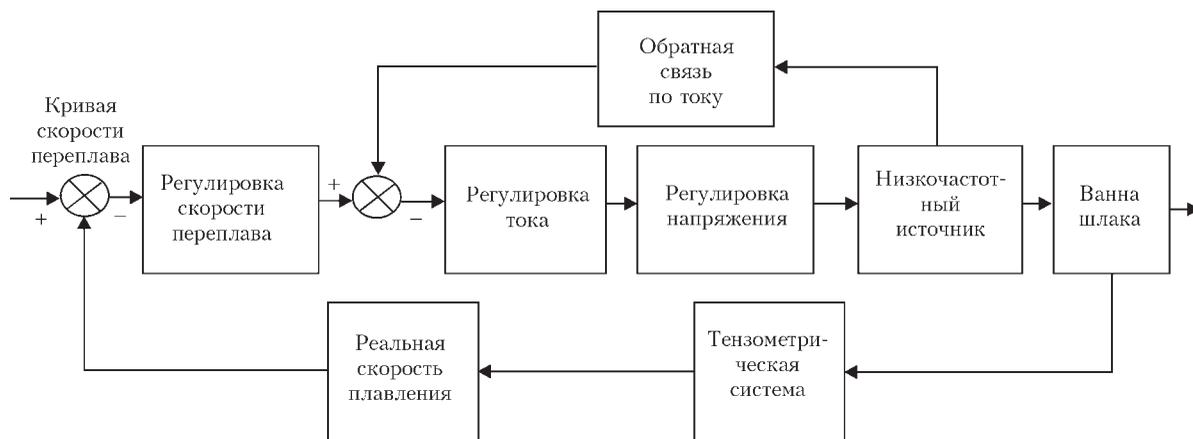


Рис. 7. Принципиальная схема системы автоматического регулирования скорости плавления

Таблица 4. Химический состав электрода для пластины S500Q/Z35, мас. %

Плавка	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Mo	V	Cr	Ni	Cu	Al	Ceq
12305444N2	0,14	0,27	0,95	0,008	0,003	0,022	0,002	0,42	0,005	0,39	0,95	0,25	0,062	0,54

Таблица 5. Химический состав пластины S500Q/Z35 (ЭШП) в различных зонах, мас. %

Место отбора проб	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Ti	Mo	V	Nb	Ceq	
Головная часть	Верх	0,13	0,25	0,94	0,005	0,001	0,91	0,38	0,25	0,012	0,009	0,44	0,004	0,023	0,53
	1/4	0,13	0,26	0,93	0,008	0,001	0,92	0,40	0,24	0,009	0,009	0,42	0,005	0,022	0,53
	Центр	0,15	0,28	0,97	0,006	0,001	0,94	0,39	0,25	0,014	0,012	0,45	0,005	0,025	0,54
	Ниже 1/4	0,14	0,24	0,95	0,005	0,001	0,93	0,38	0,25	0,014	0,009	0,43	0,004	0,020	0,54
	Низ	0,14	0,24	0,94	0,006	0,001	0,92	0,39	0,25	0,011	0,009	0,44	0,004	0,022	0,54
Нижняя часть	Верх	0,14	0,28	0,95	0,006	0,001	0,93	0,40	0,25	0,013	0,009	0,43	0,005	0,022	0,54
	1/4	0,13	0,28	0,92	0,007	0,001	0,92	0,41	0,24	0,012	0,009	0,42	0,005	0,022	0,53
	Центр	0,13	0,28	0,94	0,007	0,001	0,92	0,41	0,24	0,014	0,010	0,42	0,005	0,023	0,53
	Ниже 1/4	0,14	0,26	0,94	0,007	0,001	0,94	0,4	0,25	0,006	0,008	0,42	0,005	0,022	0,54
	Низ	0,13	0,26	0,91	0,008	0,001	0,93	0,4	0,25	0,017	0,009	0,42	0,005	0,021	0,53

Таблица 6. Содержание газов в различных зонах слитка, мас. %

Элемент	Верх	Низ
N	0,0059	0,0050
O	0,0010	0,0014

фективного охлаждения нижней части слитка при его высоте 1000 мм или по сравнению с моментом горячей подпитки слитка. Поэтому реальная скорость плавления снижается во время плавки. В этом исследовании скорость плавления на начальной, средней и конечной стадиях контролировали при 1500...1700, 1300...1500 и 1100...1300 кг/ч соответственно при сечении кристаллизатора 960×2000 мм. Скорость плавления автоматически контролировали в соответствии со схемой, показанной на рис. 7.

Конструкция кристаллизатора ЭШП аналогична конструкции кристаллизатора для непрерывного литья, который состоит из четырех медных пластин с водоохлаждаемыми каналами щелевого типа. Регулировка расхода воды используется для обеспечения скорости потока более 6 м/с, разница температуры воды на входе и выходе находится в пределах 3...5 °С.

На широкой и узкой стороне вторичного охлаждающего устройства установлены горизонтально два ряда сопел для распыления по 22 и 10 в каждом ряду соответственно. Угол распыления

сопла составляет 13°, что считается достаточным для охвата поверхности слитка. Два ряда сопел снабжаются водой и выполнены из стали SU11. Скорость охлаждающей воды рассчитана в соответствии с величиной 0,1 л/кг, что достаточно для получения хорошего результата.

Качество и свойства сверхтолстой плиты S500Q/Z35 толщиной 265 мм, применяемой для крупных гидроэлектростанций. Слиток сляба ЭШП (плавка 12030073DZ) массой 41,1 т и размерами 940×1960×2810 мм был выбран для изготовления на прокатном стане опытной плиты весом 30,68 т и размерами 265×2150×6900 мм со степенью сжатия около 3,5.

Технологический процесс производства слитков следующий: первичная плавка (UNP EAF); рафинирование в ковше; вакуумная дегазация; непрерывное литье сляба; электрошлаковый переплав; обработка поверхности сляба; нагрев; прокатка; медленное охлаждение для диффузии водорода; контроль; закалка + отпуск; резка; испытание свойств; складирование.

Химический состав электрода (сляб изготовленный непрерывным литьем) представлен в табл. 4.

Чтобы исследовать однородность химического состава и сегрегацию толстых пластин в разных местах готового изделия проведен анализ, результаты которого представлены в табл. 5.

Таблица 7. Макроструктура пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм

Место отбора проб	Толщина, мм	Пористость		Пятнистая сегрегация	Расслоение	Чешуйки	Включения	Пузырьки	Трещины
		общая	центральная						
Поверхность	265	Нет	0,5	0,5	Нет	Нет	0,5	Нет	Нет
Дно		Нет	0,5	Нет	Нет	Нет	0,5	Нет	Нет

Таблица 8. Содержание неметаллических включений в пластине S500Q/Z35 толщиной 265 мм

Номер образца	Неметаллические включения (уровень)								Ds
	А		В		С		D		
	крупные	мелкие	крупные	мелкие	крупные	мелкие	крупные	мелкие	
112-1 (верхняя часть)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-2	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-3	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-4 (1/4)	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-5	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-6	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-7	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-8 (1/2)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-9	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-10	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-11	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-12(3/4)	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-13	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-14	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-15 (нижняя часть)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0

Однородный состав и незначительная сегрегация в разных местах пластины показывают, что технология процесса литья, прокатки и термической обработки являются вполне обоснованными.

Хорошо известно, что содержание газа является еще одним важным показателем, который отражает чистоту стали, а более низкое способствует улучшению всех характеристик стальной пластины (табл. 6).

Оценку дефектов пластин выполняли в соответствии с GB226-77 (табл. 7).

Как видно из таблицы, макроструктура пластины плотная, имеет незначительную пористость и сегрегацию, но без макроскопических дефектов, таких как пузырьки и трещины, что говорит о хорошем внутреннем качестве пластины.

Оценку наличия неметаллических включений в пластине проводили в соответствии с GB10561-89 (табл. 8).

Таблица 9. Результаты испытаний пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм

Место отбора проб	Ширина пластины	Толщина пластины	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_n , МПа	δ , %
Верх	1/4	1/4	474	591	24,0
		1/2	465	587	23
	1/2	1/4	478	589	22
Низ		1/2	469	587	20
	1/4	1/4	472	587	19,5
		1/2	470	573	19
	1/2	1/4	483	598	23
		1/2	468	577	19

Из таблицы следует, что стальная пластина имеет высокую степень чистоты судя по низкому содержанию неметаллических включений.

В соответствии со стандартом GB/T 2970 и UT были проведены испытания на наличие дефектов

Таблица 10. Значения ударной вязкости стальной пластины S500Q/Z35 в разных местах и разных направлениях

Место отбора проб		Направление	-20 °C, KCV, Дж/см ² *		
Верх	1/4 ширины	продольное	134	158	145
		поперечное	114	134	126
		Z	178	142	172
	1/2 толщины	продольное	110	102	89
		поперечное	114	96	101
		Z	112	95	96
Низ	1/4 ширины	продольное	198	176	203
		поперечное	167	141	123
		Z	153	126	123
	1/2 толщины	продольное	163	144	173
		поперечное	163	144	173
		Z	142	136	140

*Испытания проводили на трех образцах.

Таблица 11. Результаты воздействия старения на стальную пластину S500Q/Z35 толщиной 265 мм при 5 % деформации

Номер пластины	Температура, °С	Надрез	Направление	Место	Деформация, %	Ударная вязкость, Дж/см ² *		
220306	0	V	поперечное	1/4	5	188	119	121
	0	V	->-	1/4	5	159	240	148
	0	V	->-	1/4	5	237	119	157

*Испытания проводили на трех образцах.

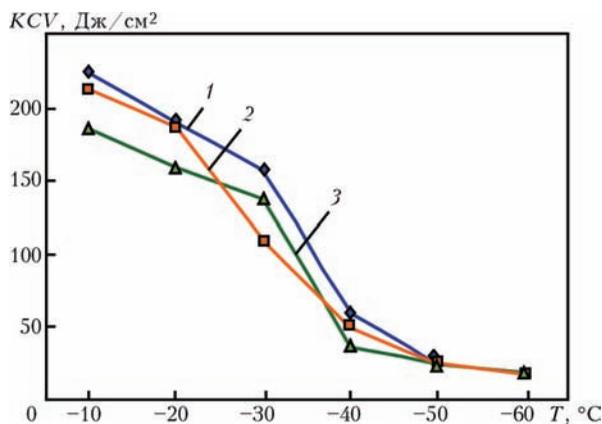


Рис. 8. Зависимость ударной вязкости от температуры в продольном (1), поперечном (2) и Z-направлениях (3)

в структуре периферийной и центральной зон пластины и квалификационный уровень составил 1.

Результаты испытаний пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм на растяжение и ударную вязкость показаны в табл. 9, 10.

Как видно из табл. 10, стальная пластина обладает надежной ударной вязкостью при низкой температуре. Ее свойства в продольном, поперечном и Z-направлениях верхней и нижней частей, 1/2 и 1/4 толщины отличаются незначительно, что свидетельствует о том, что сталь имеет хорошую изотропность. На рис. 8 показано, что температура вязко-хрупкого перехода (ДВТТ) составляет около $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты воздействия старения на стальную пластину S500Q/Z35 толщиной 265 мм при 5 % деформации показаны в табл. 11.

Свойства пластины S500Q/Z35 в Z-направлении в разных местах показаны в табл. 12.

Выводы

1. Три типа печей ЭШП для производства слябов весом 50 т с максимальным поперечным сечением 960×2000 мм успешно разработаны и введены в эксплуатацию. С 2007 г. налажено производство слябов из сталей марок P20, WSM718R, 2.25Cr1Mo, 16MnR(НІС), S355J2 + N-Z35 и 20MnNiMo толщиной 640, 760 и 960 мм и плит толщиной от 20 до 410 мм.

2. Для данных типов печей ЭШП использованы низкочастотный источник питания, бифилярное со-

Таблица 12. Свойства пластины S500Q/Z35 в Z-направлении в разных местах

Место отбора проб		$\psi, \%$ *		
Верх	1/4 ширины	56	57	59
	1/2 ширины	57	53	54
Низ	1/4 ширины	57	52	53
	1/2 ширины сляба	49	54	50

*Испытания проводили на трех образцах.

единение электродов, схема перепада с подвижным кристаллизатором, защитные газы, вторичное охлаждение, регулирование скорости плавления электродов и другие современные технологии.

3. Разработанный пятикомпонентный шлак пригоден для использования в режиме подъема кристаллизатора, что обеспечивает хорошее качество поверхности, а также стабильность и однородность состава слитка ЭШП.

4. Оптимизируя процесс плавления шлака с применением защитных газов и раскисления, можно контролировать низкое содержание водорода, кислорода и включений в слитке-слябе ЭШП.

5. Путем комплексного применения различных технологий удалось изготовить сверхтолстую пластину ЭШП S500Q/Z35 толщиной 265 мм, обладающую отличными качеством и свойствами, которая применяется для гидроэлектростанций. Полученные пластины имеют высокую степень чистоты, однородный состав и микроструктуру, отличные механические и сварочные свойства. Показатели ударной вязкости в продольном, поперечном и Z-направлениях отличаются незначительно, что свидетельствует о хорошей изотропности стали. Все свойства соответствуют требованиям заказчиков.

6. Разработанная технология применена при изготовлении толстых плит из разных марок сталей толщиной 350 мм для нескольких гидроэлектростанций в Китае.

Авторы выражают благодарность Национальному фонду естествознания китайского молодёжного проекта № 51104038 и Программе для инновационной исследовательской группы Ляонин в Северо-Восточном университете с грантом № LT20120008.

Список литературы/References

1. Quansheng Wang, Guoguang Cheng (2006) Technical analysis on feasibility of WISCO 40 t ESR ingot project. *Heavy Plate*, 12(2), 21–25.
2. Zhouhua Jiang, Yanwu Dong, Ximin Zang, Huabing Li (2011) The new development of special metallurgy technology for special steels. *China Metallurgy*, 21(12), 1–10.
3. Zhouhua Jiang. (2000) *Physical chemistry and transportation phenomena in electroslag metallurgy*. Shenyang, The Northeastern University press, 19–21.
4. Xin Geng (2009) *Process technology and quality control for electroslag remelting large slab ingots*. Shenyang, Northeastern University.
5. Kazumi Ogino, Shigeta Hara, Takashi Miwa and Shinji Kimoto (1979) The effect of oxygen content in molten steel on the interfacial tension between molten steel and slag. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 14(65), 2012–2021.
6. Tatsuhiko Kusamichi, Teruo Ishii, Toshio Onoye, Kiichi Narita (1980) Effect of composition of slag on heat transfer characteristics in electroslag remelting process, Tetsu-to-Hagane. *Ibid.*, 66(12), 1640–1649.
7. Yanwu Dong, Zhouhua Jiang, Lianke Liang, Zhengbang Li (2011) Hydrogen permeability of slags containing calcium fluoride. *J. Cent. South Univ. Technol.*, 18(4), 1063–1067.

**МЕТАЛУРГІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЛИКИХ СЛЯБІВ,
ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ ПЕРЕПЛАВОМ**

Чжоу-хуа Цзян¹, Сю Чень¹, Синь Ген¹, Цян Ю²

¹Факультет матеріалознавства і металургії, Північно-Східний університет.

²Факультет інформатики та інженерії, Північно-Східний університет.

Уеньхуа, район Хепін, Шеньян, Ляонін, 110819, КНР. E-mail: jiangzh63@163.com

Розроблено та побудовано три типи печей для електрошлакового переплава з метою отримання слябів вагою 50 т з максимальним поперечним перерізом 960×2000 мм. Налагоджено виробництво слябів з понад 20 марок сталей товщиною 640, 760 і 960 мм, а також пластин товщиною від 20 до 410 мм. Представлені основні особливості печей ЕШП, технологія процесу, властивості слябових і надтовстих плит ЕШП, що застосовуються для гідроелектростанцій. Для ЕШП застосовували низькочастотне джерело живлення, біфілярне з'єднання, рухомий кристаллизатор, захисні гази, вторинне охолодження, регулювання швидкості плавлення і інші передові технології. Низький вміст водню, кисню і включень, а також гарна якість зливка ЕШП отримані за рахунок оптимізації технологічного процесу. Як зразок з надтовстих плит, застосовуваних для гідроелектростанцій, отримані товсті пластини S500Q/Z35 товщиною 265 мм. Бібліогр. 7, табл. 12, іл. 8.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; великий сляб; надтовста плита; сталь для гідроенергетики; властивість; Z-напрямок

METALLURGICAL CHARACTERISTICS OF LARGE SLABS, PRODUCED BY ELECTROSLAG REMELTING

Zhou-hua Jiang¹, Xu Chen¹, Xin Geng¹, Qiang Yu²

¹School of Metallurgy, Northeastern University.

²School of Information, Northeastern University.

Wenhua Rd., Heping district, Shenyang, Liaoning, 110819, PR China. E-mail: jiangzh63@163.com

Three types of furnaces for electroslag remelting have been designed and manufactured for producing slabs of 50 ton weight with a maximum 960×2000 mm cross section. Production of slabs of more than 20 grades of steels of 640, 760 and 960 mm thicknesses, as well as plates from 20 up to 410 mm thickness was organized. Presented are the main peculiar features of ESR furnaces, technology of the process, properties of slabs and super-thick ESR plates, used for hydropower stations. A low-frequency power source, bifilar connection, mobile mould, shielding gases, secondary cooling, control of melting rate and other advanced technologies were used for ESR. The low content of hydrogen, oxygen and inclusions, as well as a good quality of the ESR ingot were obtained due to the technological process optimizing. As a sample of super-thick plates, used for hydropower stations, the thick plates S500Q/Z35 of 265 mm thickness were produced. Ref. 7, Tabl. 12, Fig. 8.

Key words: electroslag remelting; large slab; super-thick plate; steel for hydropower station; property; Z-direction

Поступила 30.12.17

СУЧАСНІ РЕЙКОВІ СТАЛІ І МОЖЛИВОСТІ ЕШП (Огляд). Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізничних рейок магістральних колій

Л. Б. Медовар, Г. П. Стовпченко, Г. О. Полішко,
Д. О. Коломієць, Є. О. Педченко, В. А. Зайцев

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Зроблено порівняння вітчизняного стандарту на залізничні рейки та сучасних закордонних. Показано, що в Україні вимоги до залізничних рейок значно м'якші в порівнянні з закордонними і не забезпечують сучасного рівня їх якості. Проаналізовано зв'язок сучасних металургійних технологій виробництва рейок та їх якості, зокрема можливості технології вакуум-вуглецевого розкислення рейкової сталі й відмови від розкислення алюмінієм. Показана доцільність розробки нового стандарту України на залізничні рейки та можливість використання електрошлакового переплаву для рейок найвищої якості. Бібліогр. 27, табл. 3.

Ключові слова: залізничні рейки; рейкові сталі; бейнітні; перлітні; гіпервтектоїдні; вакуум-вуглецеве розкислення; макроструктура; електрошлаковий переплав; стандарт

Зростання ролі, що її відіграє стандартизація, є загальновідомою. Але при заглибленні в проблеми рейкових сталей виявляється напрочуд велике різноманіття стандартів різних країн. З огляду на постійно зростаючі швидкості й навантаження на залізничні колії зроблено спробу співставити вимоги різних стандартів і виявити загальні тенденції, що можуть бути використані при подальшому розвитку.

Якість сьогодні є основною конкурентною перевагою і найважливішим критерієм для споживачів. В умовах всесвітньої глобалізації та відкритих ринків, росту різноманіття пропозиції товарів споживачі поряд з адекватною ціною вимагають від виробників міжнародних сертифікатів якості товарів, а в деяких випадках і підтвердження відповідності технології виробництва сучасному рівню.

За таких умов роль стандартів постійно підвищується так само як і вимоги, які вони регламентують. Вітчизняні стандарти у великій мірі наслідують сьогодні застарілий тогочасний передовий досвід радянської індустрії і особливості виробничих потужностей, що склалися історично. За 25 років в незалежній Україні вже проведено часткову гармонізацію стандартів з європейськими і світовими аналогами, але стандарт на залізничні рейки досі не повністю відповідає сучасному рівню.

В нашому огляді ми зосередимося на тих критеріях, що мають бути забезпечено на стадії металургійного виробництва (переважно виплавки і розливки сталі). Особливу увагу зосереджено на тих особливостях хімічного складу, які залежать від технології виробництва рейкової сталі і суттєвим чином впливають на безпеку і строк експлуатації залізничних колій. Відмітимо одну важливу обставину, яка стосується питання ефективності

стандартизації. Так, характерною рисою сучасного європейського стандарту на рейки [1] є і те, що окрім приймальних іспитів передбачено ще й проведення кваліфікаційних випробувань. Кваліфікаційні випробування за ним передбачають ряд вимог до працездатності, яких раніше не було в попередніх нормах. Вони також включають типові результати відповідних приймальних випробувань, які повинні контролювати задані властивості високоякісної залізничної сталі відповідно до норми EN ISO 9001 і вимагають від виробників застосовувати новітні перевірені технології. Основний принцип прийняття критеріїв базується на вимірних значеннях твердості [2]. У кваліфікаційних випробуваннях для залізничних рейок введено такі нормовані властивості сталей: в'язкість в злам, швидкість росту втоми, тест на витривалість, залишкові напруги в підшві рейок тощо [2].

Крім того, критичним параметром створення так званого «оксамитового шляху» є використання рейок максимальної довжини. Тож величина, яку регламентує вітчизняний стандарт (25 м), є значно нижчою за таку (100...150 м) у провідних виробників (NKK (Японія), Voestalpine Shinen (Австрія), British Steel (Великобританія), Arcelor Mittal (Англія, Франція), CRRC Corporation (Китай), МЕТЧЕЛ та ЕВРАЗ (Росія)), і має бути переглянута. Зрозуміло, що для випуску таких рейок необхідною є заміна прокатного обладнання на металургійному заводі, що потребує капіталовкладень, але є умовою виробництва конкурентної продукції.

Аналіз характерних систем легування і мікролегування сучасних рейкових сталей. Відомо, що перші рейки виготовляли з чавуну і сучас-

Таблиця 1. Хімічний склад сталей за вітчизняним стандартом ДСТУ 4344:2004, мас. %

Марка сталі	C	Mn	Si	V	Ti	P	S	Al
						Не більше		
M74Ф*	0,69...0,80	0,8...1,3	0,18...0,40	0,03...0,07	—	0,035	0,040	0,015
K74Ф	—»—	—»—	—»—	—»—	—	0,035	0,040	—»—
E74Ф	—»—	—»—	—»—	—»—	—	0,030	0,025	—»—
M74Т*	—»—	—»—	—»—	—	0,007...0,025	0,035	0,040	—»—
K74Т	—»—	—»—	—»—	—	—»—	0,035	0,040	—»—
E74Т	—»—	—»—	—»—	—	—»—	0,030	0,025	—»—
M74*	—»—	—»—	—»—	—	—	0,035	0,040	0,025
K74	—»—	—»—	—»—	—	—	0,035	0,040	—»—
E74	—»—	—»—	—»—	—	—	0,030	0,025	—»—
M76Ф*	0,71...0,82	—»—	0,25...0,40	0,03...0,07	—	0,035	0,040	0,015
K76Ф	—»—	—»—	—»—	—»—	—	0,035	0,040	—»—
E76Ф	—»—	—»—	—»—	—»—	—	0,030	0,025	—»—
M76Т*	—»—	—»—	—»—	—	0,007...0,025	0,035	0,040	—»—
K76Т	—»—	—»—	—»—	—	—»—	0,035	0,040	—»—
E76Т	—»—	—»—	—»—	—	—»—	0,030	0,025	—»—
M76*	—»—	—»—	—»—	—	—	0,035	0,040	0,025
K76	—»—	—»—	—»—	—	—	0,035	0,040	—»—
E76	—»—	—»—	—»—	—	—	0,030	0,025	—»—

*З початку 2011 р. рейки з мартенівської сталі не виробляються.

ні рейкові сталі також зберегли в своєму складі досить високий вміст вуглецю, який є найбільш ефективним і економічним зміцнювачем сплавів на основі заліза і основним легуючим і структуроутворюючим елементом в них. Сьогодні вживані три основних типи сталей, структура яких визначається хімічним складом і термічною обробкою: перлітні, бейнітні і заевтектоїдні (гіперевтектоїдні). Структура з пластичного фериту і високоміцного цементиту є базовою для рейок із високоміцних перлітних сталей, в яких механічні властивості значною мірою визначаються відстанню між ламелями цементиту (Fe₃C), їх товщиною та розміром зерна [3, 4]. Є багато напрацювань щодо термічної (об'ємної, поверхневої та/або часткової) обробки рейок, правильність виконання якої є важливим чинником технологічного процесу одержання рейок преміум якості, але не відноситься до задач цього дослідження.

Хімічний склад рейкових сталей за вітчизняним стандартом [5] шість марок вуглецевої та

мікролегованої ванадієм і титаном (74Ф, 74Т, 74, 76Ф, 76Т і 76) різних способів виробництва (М — мартенівська, К — киснево-конвертерна, Е — електросталь) представлено в табл. 1.

Порівняння сортаменту рейок за вітчизняним стандартом з аналогами (Російський ГОСТ Р51685–2013 [6] та Європейський EN13674-1:2003+A1:2007 [1] стандарти) на рейки для магистральних залізниць показує суттєві відмінності на користь двох останніх (табл. 2, 3).

Відмітимо, що в українському стандарті досі залишаються рейкові сталі з низьким вмістом вуглецю (74Ф, 74Т, 74), які сьогодні не задовільняють зростим вимогам до зносостійкості та попередження контактної-втомних пошкоджень. І, навпаки, відсутніми є заевтектоїдні (гіперевтектоїдні) марки сталі, для яких характерним є значно вищий вміст вуглецю (0,83...0,95 мас. %), і які завдяки цьому мають майже на 25 % кращу зносостійкість. Такі сталі протягом останніх років успішно використовують для будівництва вантажних залізниць

Таблиця 2. Хімічний склад рейкових сталей за ГОСТ Р 51 685–2013, мас. %

Марка сталі	C	Mn	Si	V	Cr	N	P	S	Al
							Не більше		
90ХАФ	0,83...0,95	0,75...1,25	0,25...0,60	0,08...0,15	0,20...0,60	0,010...0,020	0,020	0,020	0,004
76ХАФ	0,71...0,82	0,75...1,25	0,25...0,60	0,05...0,15	0,20...0,80	0,010...0,020	0,020	0,020	0,004
90ХАФ	0,71...0,82	0,75...1,25	0,25...0,60	0,03...0,15	0,20...0,80	—	0,020	0,020	0,004
76ХАФ	0,71...0,82	0,75...1,25	0,30...1,10	0,05...0,15	0,50...1,25	—	0,020	0,020	0,004
76ХФ	0,83...0,95	0,75...1,25	0,25...0,60	0,08...0,15	—	0,010...0,020	0,020	0,020	0,004
76ХСФ	0,71...0,82	0,75...1,25	0,25...0,60	0,05...0,15	—	0,010...0,020	0,020	0,020	0,004
90АФ	0,71...0,82	0,75...1,25	0,25...0,60	0,03...0,15	—	—	0,020	0,020	0,004
76АФ	0,83...0,95	0,75...1,25	0,25...0,60	0,08...0,15	0,20...0,60	0,010...0,020	0,020	0,020	0,004

Таблиця 3. Хімічний склад сталей, механічні властивості і твердість рейок за європейським стандартом EN 13674-1:2003+A1:2007

Марка сталі	Зразок	Хімічний склад, мас. %				
		C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}
R200	рідкий	0,4...0,6	0,70...1,20	0,15...0,58	0,035	0,035
	твердий	0,38...0,62	0,65...1,25	0,13...0,60	0,040	0,040
R220	рідкий	0,5...0,6	1,00...1,25	0,20...0,60	0,025	0,025
	твердий	0,48...0,62	0,95...1,30	0,18...0,62	0,030	0,030
R260	рідкий	0,62...0,80	0,70...1,20	0,15...0,58	0,025	0,025
	твердий	0,60...0,82	0,65...1,25	0,13...0,60	0,030	0,030
R260Mn	рідкий	0,55...0,75	1,30...1,70	0,15...0,60	0,025	0,025
	твердий	0,53...0,77	1,25...1,75	0,13...0,62	0,030	0,030
R320Cr	рідкий	0,60...0,80	0,80...1,20	0,50...1,10	0,020	0,025
	твердий	0,58...0,82	0,75...1,25	0,48...1,12	0,025	0,030
R350HT	рідкий	0,72...0,80	0,70...1,20	0,15...0,58	0,020	0,025
	твердий	0,70...0,82	0,65...1,25	0,13...0,60	0,025	0,030
R350LHT	рідкий	0,72...0,80	0,70...1,20	0,15...0,58	0,020	0,025
	твердий	0,70...0,82	0,65...1,25	0,13...0,60	0,025	0,030
R370CrHT	рідкий	0,70...0,82	0,70...1,10	0,40...1,00	0,020	0,020
	твердий	0,68...0,84	0,65...1,15	0,38...1,02	0,025	0,025
R400HT	рідкий	0,90...1,05	1,00...1,30	0,20...0,60	0,020	0,020
	твердий	0,88...1,07	0,95...1,35	0,18...0,62	0,025	0,025

Закінчення табл. 3

Марка сталі	Зразок	Хімічний склад, мас. %				10 ⁻⁴ (ppm) мас. % максимум		σ _b , МПа	φ, %	Твердість поверхні кочення рейки, HB
		Cr	Al _{max}	V _{max}	N _{max}	O	H			
R200	рідкий	≤0,15	0,004	0,030	0,009	20	3,0	—	—	—
	твердий	≤0,15	0,004	0,030	0,010	20	3,0	680	14	200...240
R220	рідкий	≤0,15	0,004	0,030	0,009	20	3,0	—	—	—
	твердий	≤0,15	0,004	0,030	0,010	20	3,0	770	12	220...260
R260	рідкий	≤0,15	0,004	0,030	0,009	20	2,5	—	—	—
	твердий	≤0,15	0,004	0,030	0,010	20	2,5	880	10	260...300
R260Mn	рідкий	≤0,15	0,004	0,030	0,009	20	2,5	—	—	—
	твердий	≤0,15	0,004	0,030	0,010	20	2,5	880	10	260...300
R320Cr	рідкий	0,080...1,20	0,004	0,18...0,20	0,009	20	2,5	—	—	—
	твердий	0,75...1,25	0,004	0,030	0,010	20	2,5	1080	9	320...360
R350HT	рідкий	≤0,15	0,004	0,030	0,009	20	2,5	—	—	—
	твердий	≤0,15	0,004	0,030	0,010	20	2,5	1175	9	350...390
R350LHT	рідкий	≤0,30	0,004	0,030	0,009	20	2,5	—	—	—
	твердий	≤0,30	0,004	0,030	0,010	20	2,5	1175	9	350...390
R370CrHT	рідкий	0,40...0,60	0,004	0,030	0,009	20	1,5	—	—	—
	твердий	0,35...0,65	0,004	0,030	0,010	20	1,5	1280	9	370...410
R400HT	рідкий	≤0,30	0,004	0,030	0,009	20	1,5	—	—	—
	твердий	≤0,30	0,004	0,030	0,010	20	1,5	1280	9	400...440

з навантаженням на вісь 30 т та більше [7]. Досягнення високої міцності та твердості може йти як за рахунок збільшення вмісту вуглецю та легуючих елементів, так і шляхом термічної обробки чи обома шляхами для одержання оптимальної тонкої структури металу, що поряд з заданим хімічним складом забезпечує комплекс технологічних властивостей та строк служби рейок. Оскільки рейки є металомісткою продукцією масового випуску, то для їх легування зазвичай використо-

вують марганець і рідше хром (до 3 % в сумі), а також мікролегування ванадієм, ніобієм, титаном, молібденом.

Однак багатьма дослідженнями було показано, що легуванням можливо досягти твердості лише близько 350 одиниць за Брінелем (BHN). Тому починаючи з 1990-х років, подальше її зростання забезпечують процесами термічної обробки.

Компанія «Ніппон кокан» (НКК, Японія) розробила високостійкі термозміцненні перлітні

рейки серії ТНН370 (клас міцності на розрив — 1300 МПа) для роботи на важконавантажених залізницях. У структурі цієї рейкової сталі міжпластинчата відстань в перліті (МВП) є менш 0,2 мкм, що забезпечується «онлайн» термообробкою. Поліпшення характеристик перлітових сталевих рейок досягнуто переважно за рахунок зменшення відстані між перлітними ламелями [8]. Оскільки досягнуте зменшення МВП в ТНН370 наближається до теоретично можливої (0,1 мкм), то можна вважати, що межу вдосконалення перлітових сталевих рейок також вже практично досягнуто.

Загально визнаними чинниками, що негативно впливають на контактну втоми кочення і знос, є неметалеві включення і велика МВП. Прийнято вважати, що зносостійкість рейкової сталі безпосередньо залежить від твердості і МВП. У той же час, в роботі [9] встановлено, що присутність доєвтектоїдного цементиту і розмір зерна аустеніту також грають важливу роль в появі контактної втоми кочення і зносу.

Позитивний вплив подрібнення структурних складових і розвиненої комірчастої дислокаційної структури на збільшення міцності і пластичності показали полігонні випробування залізничних рейок Р65 сталі бейнітного класу марки E30XГ2САФМ. Інтенсивність бокового та вертикального зносу рейок зі сталі цієї марки на 10 і 23 % відповідно менше в порівнянні з інтенсивністю зносу об'ємно-загартованих рейок зі сталі марки E76Ф. Відзначимо, що отриманий ефект досягнуто при зміні хімічного складу сталі і не може бути віднесено тільки до рафінування структури, оскільки сталь додатково легована хромом, азотом, ванадієм і молібденом. Введення 0,07...0,08 % ванадію і 0,012...0,017 % азоту підвищило пластичні властивості і ударну в'язкість сталі з високим вмістом вуглецю, а також забезпечило підвищення опору рейок крихкому руйнуванню [10].

В роботі [11] виконано дослідження ефективності мікролегування рейкової сталі карбонітридоутворюючими елементами і визначено кількісний взаємозв'язок параметрів мікроструктури і механічних властивостей рейкової сталі. Вибрано оптимальний склад рейкової сталі, мікролегованої ванадієм. Запропоновано механізм, що пояснює ефективний вплив ванадію на опір втомному руйнуванню рейкової сталі, який полягає в локальному підвищенні температури в зоні біля вершини тріщини до значень, достатніх для виділення карбонітридів ванадію, які перешкоджають зростанню втомної тріщини.

Мікроструктура і поведінка при зносі в умовах контактної втоми кочення п'яти бейнітних сталей з низьким вмістом вуглецю і легуванням молібденом і бором досліджено авторами роботи

[12]. Зносостійкість збільшувалася при наявності в структурі сталі безкарбідного бейніту. Ступінь вмісту цієї форми бейніту в мікроструктурі збільшувалася при більш високому (з досліджених) вмісті вуглецю і швидкості охолодження. Сталь з вмістом 0,18 % С і 1,13 % Si в загартованому стані показала таку ж поведінку при зносі, як і перлітні рейки з загартованою голівкою 0,8 % С [13].

Придатність перлітних і бейнітних рейкових сталей для використання на залізницях, де є проблеми контактної-втомного руйнування при коченні колеса, досліджували фахівці компанії «Системтехник» [14]. Показано, що при правильному легуванні і контролі форми сульфідів, природно тверда сталь без термообробки може бути альтернативою рейкам із загартованою голівкою. Бейнітні рейкові сталі можуть забезпечити баланс між процесами зносу і контактної втоми втримуючи їх розвиток на невисокому рівні. Результати авторів роботи [14] також показують, що високохромиста сталь з середнім вмістом вуглецю і, отже, значно більшою міцністю, забезпечує кращу зносостійкість, ніж високомарганцовиста сталь з нижчим вмістом вуглецю.

Експериментальні результати, що було проаналізовано за допомогою нейронних мереж, вказують на те, що найважливішим фактором у подовженні кількості циклів до початку утворення тріщини в гіперевтектоїдних сталях є твердість, що досягнута шляхом збільшення швидкості охолодження від температури гарячої прокатки, однак відповідні легуючі добавки можуть ще більше посилити ефект. Більш тверді швидко охолоджені зразки демонструють менше пластичне течіння поверхні, ніж м'які повільно охолоджені. Стосовно хімічного складу було доведено, що для зміцнення фериту корисний кремній, який знижує напруження несумісності з цементитом і таким чином запобігає фрагментації і розчиненню ламелі. Це вигідно, оскільки більш глибоке розчинення цементиту виявлено в зразках з меншою кількістю циклів до ініціювання тріщини для заданої швидкості охолодження. Зразки, що містять ванадій, витримували довше і мали меншу пластичну деформацію на поверхні, ніж ті, що не мали аналогічної твердості [15].

Особливістю марочного складу всіх сталей за російським стандартом є тотальне мікролегування ванадієм, що пояснюється проявом позитивної дії самого елемента і особливостями сировинної бази виробництва. Ванадій використовують і в європейських марках сталей, однак лише у разі легування рейкової сталі хромом в кількості 0,75...1,25 %. В інших марках його максимальний вміст обмежено до 0,03 %.

Ще однією особливістю російського сортаменту є наявність марок сталей з вмістом 0,01...0,02 %

азоту. Це вже можна вважати легуванням азотом, яке є доволі ефективним способом покращення міцності. Однак сталі, леговані азотом, при зварювальному нагріві частково втрачають свої властивості за рахунок випаровування і шов, що утворюється, стає менш міцним ніж основний метал. Легування азотом також потребує введення до складу сталі нітридоутворюючих елементів, серед яких є ванадій, а також титан, вміст яких регламентовано в стандарті РФ. Відмінністю вимог ДСТУ до складу рейкових сталей також є регламентація добавок ванадію і титану, які створюють карбонітридне зміцнення сталі і стримують рост зерна при нагріванні. В той же час сучасні тенденції показують застережне відношення до мікролегування титаном, оскільки його нітриди мають ограничену форму і можуть провокувати утворення тріщин.

Відмітимо також, що у позначці марок сталі за європейським стандартом входять цифри, що показують нижню межу норми твердості поверхні катання рейки (за Брінеллем — *HB*), що вводить важливу кореляцію між нормованими властивостями і хімічним складом. Рейкові сталі преміум класу сьогодні мають твердість більше ніж 400 *HB*, що є можливим завдяки комплексу металургійних (в тому числі економного легування) та термообробних операцій.

Вимоги до вмісту газів, домішок і неметалевих включень та пов'язані з ними особливості технології сталеплавильного виробництва. Суттєвим недоліком вітчизняного стандарту є те, що в ньому не регламентовано загальну масову частку кисню у сталі, яка не має перевищувати 0,0020 % (20 частин на мільйон (далі ppm)) за сучасними вимогами. В російському стандарті введено ще й обмеження масової частки кисню в високоглиноземних оксидних включеннях, що не повинна перевищувати 0,0010 % (10 ppm). Введення обмеження їх вмісту є ознакою відсутності присадок алюмінію, що разом з необхідністю забезпечення регламентованого на низькому рівні вмісту кисню вимагає перегляду стереотипів, які склалися щодо технології розкиснення.

Небажаність алюмінію як розкислювача давно відома для високовуглецевих кордових і канатних марок сталей. Виробники не тільки виключають присадки алюмінію, але і уникають використання феросплавів з високим вмістом алюмінію [16, 17] і максимально застосовують можливості вакуум-вуглецевого розкиснення. Аналогічні підходи є ефективними і при виплавці підшипникових сталей, для яких характерним є контактно-втомне руйнування [18], оскільки включення оксиду і нітриду алюмінію чинять дуже шкідливий вплив.

Зазначимо добре відомий факт, що найбільш повно вимогам щодо вмісту шкідливих домішок

та неметалевих включень задовільняють високовуглецеві, зокрема підшипникові, сталі, що вироблено способами ЕШП та ВДП [19].

Проблема неметалевих включень оксиду алюмінію загострюється ще й тому, що вони схильні до агломерування з утворенням великих агрегатів, які провокують утворення тріщин. В той же час власний досвід показує можливість глибокого розкиснення сталей близьких за вмістом вуглецю [20, 21] з максимальним використанням вакуум-вуглецевого і прецизного фінального розкиснення присадками сілікокальцію (феррокальцію). Аналогічні висновки зроблено в роботі [22], результати якої показують, що розкиснення без використання алюмінію дозволяє одержати загальний вміст кисню в сталі нижче 20 ppm, що відповідає вимогам чистої рейкової сталі.

За даними роботи [23] вміст кисню у залізничній сталі мінімальний (5 ppm) при розкисненні карбідом кальцію (CaC_2), що вводять у метал в конверторі. Коли метал розкислюють за допомогою сталевого дроту, наповненого кальцієм або сілікокальцієм, вміст кисню у рейковій сталі становить приблизно 8 та 11 ppm відповідно. Порівняння різних процесів розкиснення залізничної сталі в умовах ВАТ «НТМК» показує, що обмеження вмісту алюмінію (не більше 30 ppm) або використання дроту з наповнювачем із карбиду кальцію або кальцію є більш ефективним, ніж використання дроту заповненого сілікокальцієм [23].

В той же час автори роботи [24] показали, що при вмісті кисню менш ніж 25 ppm в рейковій сталі знаходять переважно крихкодеформовані оксидні включення типу CaOAl_2O_3 , які є більш небезпечними з точки зору утворення контактно-втомних дефектів в процесі експлуатації рейок ніж деформовані сілікати, що знаходять при більшому вмісті кисню. При вмісті кисню понад 40 ppm загальна забрудненість сталі зростає до другого балу і неметалеві включення представлені переважно сілікатами.

Тож, високий вміст алюмінію, що його зараз регламентує вітчизняний стандарт, слід замінити на максимально допустимий його рівень, що не має перевищувати 40 ppm, як це рекомендовано європейським стандартом, оскільки за таких умов забезпечується низька забрудненість сталі неметалевими включеннями і залишається гнучкість технології розкиснення для досягнення формування включень сприятливої морфології.

Про застарілість технічних умов на рейки свідчить і те, що не регламентується вміст водню, а лише вказано, що: «Технологія виготовлення рейок повинна гарантувати відсутність в них флокенів» і, крім того, пропонується використовувати протифлокенове оброблення, яке сьогодні є зайвим за умови забезпечення відповідного рівня водню в

рідкій сталі. Заданий в сучасних стандартах рівень водню не повинен перевищувати 1,5...3,0 ppm, причому для сталей підвищеної міцності вимоги є більш жорсткими. Тобто, для одержання рейок високої якості необхідним є використання технологій та обладнання вакуумної обробки сталі. Причому згадане раніш вакуум-вуглецеве розкислення сталі без присадок сильних розкислювачів дає додаткове зниження вмісту водню при вакуумуванні, оскільки відбувається його перехід в пухирі CO, що утворюються при цьому. Більш того, вакуумування з одночасним вакуум-вуглецевим розкисленням дозволяє скоріше досягти бажаного рівня водню, що підвищує економічність обробки [20].

Вимоги до вмісту сірки, фосфору і кольорових металів також стають жорсткішими [25], оскільки вони негативно впливають на циклічну міцність сталі і тут так само слід керуватися найкращими зразками. Відмітимо, що знефосфорення нижче певної границі є технічно складним і витратним, а глибоке знесірчення веде до зниження здатності металу рейок до механічної обробки (шліфування), яка є частиною процедур підтримання задовільного стану залізничної колії.

Таким чином, чистоту металу за вмістом газів та неметалевих включень в традиційному сталеплавильному циклі визначають операції вакуумування і розкислення, технологію яких має бути оптимізовано за кількістю та складом присадок розкислювачів, що додають, тривалістю та інтенсивністю перемішування при продувці в ковші, здатністю шлаку асимілювати неметалеві включення. Важливою є і організація процесу розливання, оскільки необхідно запобігти вторинному окисленню металу, сформувати бездефектну поверхневу кірку і виключити усадку в центральній зоні, що в максимальному ступені реалізується при використанні електрошлакового переплаву.

Вимоги до макроструктури рейкового металу. Важливим кроком вперед в європейському стандарті є детальний опис ознак для бракування за макроструктурою і наведення еталонних перерізів рейок з описаними особливостями недоліків макроструктури. Російський і вітчизняний стандарти навпаки не приділяють належної уваги макроструктурі металу рейок. Так в ДСТУ вказано тільки, що: «...У рейках не допускають розшарування (залишки усадкової раковини і підусадкової крихкості), внутрішніх тріщин, плямисту ліквіацію, темні і світлі кірочки, чужорідні неметалеві і шлакові вкраплення», що не дає необхідної деталізації і може допускати різночитання при прийомці рейок.

В європейському стандарті (в оригіналі це таблиця D.1. Дефектуючі вади сірчаних відбитків) перелічено можливі недоліки структури (за сірча-

ними відбитками) і їх розмежування на припустимі і неприпустимі, та надано еталонні фото вказаних структур. Неприпустимими визнано такі дефекти як: негативна сегрегація в ободі; підповерхневі пухирі; подвійна позитивна і центральна сегрегація в шийці, яка поширюється на головку та підшову.

Зрозуміло, що рівень вираження макросегрегації знаходиться в прямій кореляції з умовами тверднення сталі та вмістом малорозчинних компонентів та домішок. Тому, щоб гарантувати низький рівень сегрегаційних дефектів, необхідно обмежувати вміст домішок (як це пропонується в сучасних стандартах), що ліквують, і забезпечувати сприятливі умови тверднення сталі (висока швидкість тверднення, мала двофазна зона, збереження підживлення усадки тощо).

З точки зору одержання зливків металу з мінімальною сегрегацією найкращим визнаним способом сьогодні є використання переплавних процесів спеціальної електрометалургії, зокрема електрошлакового переплаву.

Висока якість структури зливку, що формується при класичному ЕШП, можлива тільки за умови невеликої продуктивності процесу, що зрозуміло веде до високої собівартості металу й в попередні роки не дозволяло використовувати ЕШП для виробництва рейок в промислових масштабах. Однак вже зараз авторами цієї роботи розроблено, впроваджено у виробництво і продовжується вдосконалення процесів як з використанням попереднього підігріву електроду для зниження втрат електроенергії на його плавлення і зменшення перегріву металу, так і з використанням рідкого металу замість електроду, що дозволяє суттєво збільшити енергоефективність виробництва продукції зі збереженням її високої якості.

В разі використання нових підходів до вдосконалення технології та обладнання електрошлакового переплаву особливості процесу можуть бути повернені на його користь і в наступному повідомленні буде розглянуто можливі варіанти реалізації процесів електрошлакового переплаву з рідким металом та так званого «ремануфакчурина», що дозволяють зробити використання ЕШП доцільним для виробництва рейок високої якості.

Тенденції покращення сортаменту і якості рейок.

Таким чином, можна виділити наступні тенденції змінення складу рейкових сталей:

для швидкісних і важконавантажених колій залізничники повинні використовувати рейкові сталі більшої міцності, якої досягають переважно за рахунок підвищення вмісту вуглецю (заевтектоїдні (гіперевтектоїдні)), а не інших легуючих елементів; рейкові сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками мають більшу чистоту за

вмістом кисню та неметалевих включень, морфологія яких є важливою для попередження контактно-втомних пошкоджень;

вводити більш жорсткі обмеження вмісту фосфору, сірки та кольорових металів;

надважливою ланкою забезпечення властивостей рейок є термічна обробка (якої ми не торкались в цьому дослідженні), тож будь-яка новація або зміна складу рейкової сталі має бути тісно узгоджено з технологією її виробництва.

Відповідно до порівняння проведеного нашими попередниками [26, 27] та висновків власного аналізу нормативних документів, можна зробити висновок, що вимоги вітчизняного стандарту ДСТУ 4344:2004 за показниками якості металу і механічними властивостями є нижчими за такі в розглянутих аналогах за наступними позиціями:

не передбачено кваліфікаційних випробувань рейок (визначення в'язкості руйнування, статичної та циклічної тріщиностійкості), характеристик втоми, залишкової напруги в підшві рейок тощо), що не дозволяє гарантувати експлуатаційні показники;

максимальна довжина рейок регламентується 25-ма метрами, що є недостатнім для сучасних залізниць, тому бажано передбачити виробництво рейок довжиною 100...150 м і прописати вимоги до їх якості;

значно нижчими є вимоги до вмісту сірки, фосфору, кольорових металів, не регламентується допустимий вміст кисню (в тому числі в неметалевих включеннях) і алюмінію, а також водню у рейкових сталях і відповідно не визначено методи їх контролю.

Для підвищення якості рейок, що мають випускатися в Україні, необхідно провести гармонізацію вітчизняного стандарту ДСТУ 4344:2004 з європейським стандартом EN 13674-1:2003+A1:2007 на рейки широкої колії, що дозволило б металургам забезпечити потреби «Укрзалізниці» у високоякісних рейках та конкурувати на світовому ринку.

З цією метою слід виконати низку модернізаційних та організаційних заходів для забезпечення відповідності технології виготовлення сучасним вимогам і повного циклу випробувань рейок:

виконати комплекс інжинірингових робіт з аудиту та стандартизації окремих ланок і навскрізної технології виробництва (виплавки, позапічної обробки, розливки, прокатки та термообробки) рейкових сталей (найбільш придатними для цього є металургійні комбінати ПАТ «Азовсталь» і ПАТ «Дніпровський меткомбінат»), щоб забезпечити стабільний гарантований рівень якості і властивостей сучасних рейкових сталей, що будуть виготовлятися;

відпрацювати технології розкислення рейкової сталі без використання алюмінію на базі вакуум-вуглецевого розкислення для забезпечен-

ня вимог до вмісту кисню в рейковому металі, а також розробити заходи ефективного видалення водню з рідкої рейкової сталі;

провести реконструкцію існуючого або ініціювати будівництво нового рейкобалкового стану, щоб мати можливість прокатувати рейки 120...150 м завдовжки. В якості альтернативи можна розглянути доцільність використання стикового зварення більш коротких рейок в 100-метрові в пристосованих промислових умовах з організацією ефективної локальної термообробки стикових з'єднань для забезпечення їх рівномірності основному металу рейок;

розробити регламенти кваліфікаційних випробувань рейок; кваліфікаційні випробування повинні проводитися щонайменше один раз на п'ять років, а також при суттєвих змінах технології заводів, що виробляють рейки; додаткові випробування на залишкові напруги слід проводити на всі типи сталевих рейок кожні два роки максимум, оскільки рівень повздовжніх напруг деформації в рейках може досягати 250 МПа.

Попередньо кваліфікаційний іспит має містити випробування наступних показників: в'язкість руйнування; швидкість підростання втомних тріщин; випробування на витривалість; залишкові напруги в підшві рейок; відхилення центральної лінії; міцність на розрив і подовження; сегрегація; інші кваліфікаційні вимоги [27] та визначити ключові сертифіковані лабораторії для їх проведення; виконати аудит і за необхідності вдосконалити методи неруйнівного і автоматичного контролю якості залізничних рейок.

Безумовно, що одним із стимулів позитивних змін і орієнтиром на сучасні найкращі зразки для забезпечення високої якості і конкурентоспроможності нових рейок має стати науково обґрунтований Державний стандарт на магістральні рейки, що має відображати сучасні тенденції забезпечення і покращення їх якості. Зокрема, виділення і обґрунтування прогресивних вимог до рейкових сталей, а також визначення технічних і технологічних можливостей їх забезпечення є важливою умовою завчасної підготовки виробництва до випуску високоякісної продукції. Фахівці залізниці і металургії сьогодні вважають, що методи поліпшення чистоти і властивостей сталей для залізничних рейок в традиційному металургійному циклі практично вичерпано. Тому доцільно розглянути можливості, які дасть використання електрошлакових технологій, продукція яких гарантує одержання щільного металу рафінованого складу та структури з мінімальними проявами сегрегації і формування неметалевих включень сприятливої морфології, що має покращити експлуатаційні властивості рейок.

Висновки

1. Підвищення строку служби рейок досягають збільшенням їх довжини (100...150 м), вдосконаленням технології металургійного виробництва (забезпечення сталої якості, мінімум відхилень складу і шкідливих домішок, розробки нових марок рейок з підвищеним вмістом вуглецю та мікролегуванням, забезпеченням ефективної термообробки для одержання сприятливої мікроструктури тощо).

2. Сучасні тенденції змінення складу рейкових сталей наступні:

для швидкісних і важконавантажених колій залізничники використовують рейкові сталі більшої міцності, якої досягають перш за все за рахунок підвищення вмісту вуглецю (заевтектоїдні (гіперектектоїдні)), а не інших легуючих елементів;

рейкові сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками мають більшу чистоту за вмістом газів: кисню (і, відповідно, оксидних неметалевих включень), водню і азоту (за виключенням марок з карбонитридним зміцненням);

суттєве зниження вмісту алюмінію, що поряд з вимогою до низького вмісту кисню потребує перегляду технології розкиснення з відмовою від присадок алюмінію, щоб запобігти утворенню алюмінатів, що можуть провокувати тріщини;

більш жорсткі обмеження вмісту фосфору та сірки.

3. Суттєвою ланкою забезпечення властивостей рейок є зміна складу рейкової сталі, що має бути тісно узгоджено з технологією термічної обробки.

4. Вимоги вітчизняного стандарту ДСТУ 4344:2004 за показниками якості металу і механічними властивостями є нижчими за такі в європейському EN 13674-1:2003+A1:2007 і російському аналогах. Тому, щоб зробити вітчизняний стандарт дієвим інструментом підвищення якості рейок, що будуть випускати в Україні, необхідно провести його гармонізацію з європейським стандартом на рейки широкої колії, що дозволило би вітчизняному виробникові забезпечити потребу Укрзалізниці та конкурувати на світовому ринку.

5. Необхідно створити сертифікаційний базис, комплекс інжинірингових робіт з аудиту та стандартизації окремих ланок і розробки на основі кращих аналогів проекту навскрізної технології виробництва рейкових сталей, щоб забезпечити з самого початку стабільний гарантований рівень їх якості і властивостей: відпрацювати технології розкиснення рейкової сталі без використання алюмінію на базі вакуум-вуглецевого розкиснення для забезпечення вимог до вмісту кисню і водню.

6. Зважаючи на те, що залізничники і металурги сьогодні вважають, що методи поліпшення чистоти і властивостей сталей для залізничних рейок

в традиційному металургійному циклі практично вичерпано, доцільно розглянути можливості, які дасть використання електрошлакових технологій.

Список літератури/References

- (2007) *Railway applications—track—rail*. Pt 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. EN 13674-1:2003+A1:2007.
- Vitez, I., Oruč, M., Krumes, D., Kladarić, I. (2007) Damage to railway rails caused by exploitation. *Metallurgija*, 46(2), 123–128.
- (2005) *Steels: Processing, structure, and performance* (#05140G. Chapt. 15. High-carbon steels: Fully pearlitic microstructures and applications. ASM International. https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/Chapter_15_WEB.pdf
- https://www.voestalpine.com/schienen/static/sites/schienen/downloads/Definitive_guidelines_on_the_use_of_different_rail_grades_xINNOTRACK_deliverable_report_D4_1.5GLx_nur_in_Englisch_verfuegbarx.pdf
- Conventional rails of road-gage railways*. General specifications. DSTU 4344:2004. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
- (2014) Railway rails. General specifications. GOST R 51 685–2013 [in Russian].
- Saeki, K., Iwano, K. (2013) Progress and prospects of rail for railroads Nippon Steel & Sumitomo Metal. *Technical Report*, 105, 21–25.
- Girsch, G., Keichel, J., Gehrman R. et al. (2009) Advanced rail steels for heavy haul application-track performance and weldability. In: *Proc. of 9th Int. Heavy Haul Conf.* (Shanghai, China, June 22–25, 2009), 171–178.
- Ordenez, R., Garcasal, C. I., Kalay, S., Deardo, J. (2010) Development of high performance steels for rail. In: *Proc. of Joint Rail Conf. 2010*, 1 (Urbana, Illinois, USA, April 27–29, 2010), 129–133.
- Dementiev, V.P., Korneva, L.V., Serpiyanov, A.I. et al. (2007) Technology of production and exploitation of experimental rails NKMK on East Siberian Railway. In: *Proc. of All-Russian Sci.-Pract. Conf. on Problems and Prospects of Research, Design, Construction and Exploitation of Russian Railways* (10–11 October 2007, Irkutsk), Vol. 1, 29–34 [in Russian].
- Pan, A.V. *Development and implementation of new technologies for current and prospective production of rails*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Moscow [in Russian].
- Jin, N., Clayton, P. (1997) Effect of microstructure on rolling/sliding wear of low carbon bainitic steels. *Wear*, 202(2), 202–207.
- Marais, J. J., Mistry, K. C. (2003) Rail integrity management by means of ultrasonic testing. *Fatigue & Fract. of Eng. Mat. & Struct.*, 26(10), 931–938.
- Mädler, K., Zoll, A., Heyder, R., Brehmer, M. Rail materials — alternatives and limits. www.railway-research.org/sl.3.4.1.pdf
- Solano-Alvarez, W., Peet, M.J., Pickering, E.J. et al. (2017) Synchrotron and neural network analysis of the influence of composition and heat treatment on the rolling contact fatigue of hypereutectoid pearlitic steels. *Mater. Sci. and Engin.*, 707, 259–269.
- Sychkov, A.B., Zhigarev, M.A., Perchatkin, A.V. et al. (2006) High-carbon rod from steel with higher chromium content. *Metallurg*, 4, 59–62 [in Russian].
- Zazyan, A.S. (2006) Regulation of amount and composition of nonmetallic inclusions during performance of out-of-furnace treatment of high-carbon steel. *Chyorn. Metallurgiya*, 10, 40–44 [in Russian].

18. (2017) Advantages of Si deoxidation of bearing steels for steel cleanness and for composition and morphology of non-metallic inclusions. Bearing steel technologies. Ed. by J. M. Beswick. Vol. 11: Progress in steel technologies and bearing steel quality assurance. ASTM STP1600, *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 48–62.
19. Gurchenko, P.S., Solonovich, A.A. (2015) Prospects of application of carbon steels for bearings and gears with strengthened by controlled volumetric-surface quenching from induction heating. *Litio i Metallurgiya*, **1**, 91–97 [in Russian].
20. Tyagny, V.V., Stovpchenko, A.P., Grishchenko, Yu.N. et al. (2007) Increase in efficiency of metal degassing for railway wheels. *Stal*, **8**, 30–33 [in Russian].
21. Projdak, Yu.S., Stovpchenko, A.P., Kamkina, L.V. et al. (2008) Experimental investigation of gas saturation of high-strength rope steel in out-of-furnace treatment process. In: *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej. Chestochowa, Wydawnictwo Politechniki Czestochwskiej*, 360–363.
22. Wei Wu, Liu Liu (2008) Application of Al-free deoxidizer in rail steel manufacture. *J. of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, **15(5)**, 534–537.
23. Garber, A.K., Arsenikin, A.M., Grigorovich, K.V. et al. (2008) Analysis different technology variants for rail steel deoxidation in OSJC NTMK. *Elektrometallurgiya*, **10**, 3–7 [in Russian].
24. Kozurev, Z.A., Protopopov, E.V., Aizatylov, R.C., Boikov, D.V. New production technology of rail steel. *Izvestiya. Chern. Metallurgiya*, 2012; **55(2)**, 25–29 [in Russian]. DOI: 10.17073/0368-0797-2012-2-25-29.
25. <http://www.indexbox.ru/news/rossijskie-relysy-vytesnyayut-import/2016>: Index box
26. Rudyuk, O., Pykhtin, Ya., Ivanysenko, L., Bezpoyasova, A. (2013) Analysis of requirements of standards for main-line railway rails. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist*, **5**, 3–8 [in Ukrainian].
27. Sladojević, B. et al. (2011) New requirements for the quality of steel rails. *Metallurgija-MJoM*, **17(4)**, 213–219.

СОВРЕМЕННЫЕ РЕЛЬСОВЫЕ СТАЛИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭШП (Обзор).

Сообщение 2. Требования стандартов к химическому составу стали для железнодорожных рельсов магистральных путей

Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, А. А. Полишко, Д. А. Коломиец, Е. А. Педченко, В. А. Зайцев

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Сделано сравнение отечественного стандарта на железнодорожные рельсы и современных зарубежных. Показано, что в Украине требования к железнодорожным рельсам значительно мягче по сравнению с зарубежными и не обеспечивают современного уровня их качества. Проанализирована связь современных металлургических технологий производства рельсов и их качества, в частности возможности использования вакуум-углеродного раскисления рельсовой стали и отказа от раскисления алюминием. Показана целесообразность разработки нового стандарта Украины на железнодорожные рельсы и возможность использования электрошлакового переплава для рельсов высокого качества. Библиогр. 27, табл. 3.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы; рельсовые стали; бейнитные; перлитные; гиперэвтектоидные; вакуум-углеродное раскисление; макроструктура; электрошлаковый переплав; стандарт

MODERN RAIL STEELS. APPLICATION OF ESR (Review). Information 2.

Requirements of standards to chemical composition of steels for railway rails of main-line tracks

L.B. Medovar, A.P. Stovpchenko, A.A. Polishko, D.A. Kolomiets, E.A. Pedchenko, V.A. Zaitsev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The comparison of national standard on railway rails and modern foreign ones is made. It is shown that requirements in Ukraine to the railway rails are less strict as compared with foreign ones and do not provide the updated level of their quality. The relation of present metallurgical technologies of rail production and their quality, in particular, the feasibility of applying the vacuum-carbon deoxidation of rail steel and refuse from aluminium deoxidation, is analyzed. The need in the development of new standard of Ukraine for the railway rails and opportunity of electroslag remelting application for the high-quality rails are shown. Ref. 27, Tabl. 3.

Key words: railway rails; rail steels; bainite; pearlite; hypereutectoid; vacuum-carbon deoxidation; deoxidation; macrostructure; electroslag remelting; standard

Надійшла 02.05.2018

РАСТВОРИМОСТЬ АЗОТА ВО ФЛЮСАХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г. М. Григоренко, Р. В. Козин

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Изучены поглощение азота из газовой фазы шлаками, которые используются в электрошлаковых технологиях, а также термодинамика и кинетика поглощения азота фтористым кальцием, который является составляющей всех шлаков. Установлена взаимосвязь между содержанием азота и углерода в расплаве фтористого кальция. Описана методика взвешенной капли применительно к исследованию растворимости азота во флюсах. Определено равновесное содержание азота. Приведены данные о содержании азота в некоторых флюсах после выплавки и электрошлакового переплава, а также углерода и азота во флюсе АНФ-7, выплавленном в дуговой флюсоплавильной печи при различных условиях плавки и продувки. Проведен анализ результатов исследований, который показал, что азот во флюсах для электрошлаковых технологий предположительно находится в виде соединения CaCN_2 . Показано, что флюсы содержащие значительное количество фтористого кальция, отличаются низкой концентрацией азота и не могут являться источником обогащения металла азотом при переплаве, и возможно могут способствовать удалению из него газа. Библиогр. 11, табл. 3, ил. 4.

Ключевые слова: азот; углерод; растворимость; металл; шлак; флюсоплавильная печь; электрошлаковая технология; электрошлаковый переплав

На содержание азота в металле при электрошлаковых процессах наряду с прочими факторами влияет абсорбционная способность шлака по отношению к азоту.

Известно, что количество азота в металле при его выплавке зависит от состава шлака. Оно обычно меньше при использовании кислых шлаков, чем основных [1]. В зависимости от способа выплавки изменяется содержание азота не только в металле, но и в шлаках [2]. Установлена взаимосвязь между концентрацией азота в шлаке и в металле [3, 4]. По данным работы [2], растворимость его в основных шлаках в два-три раза больше, чем в железе. В кислых шлаках с повышением температуры азот растворяется почти в три раза быстрее, чем в железе, а защитное действие шлака при этом ухудшается.

При изучении растворимости азота в известково-глиноземистых шлаках [5–9] установлено, что безжелезистые шлаки восстановительного периода электроплавки могут поглощать сравнительно большое количество азота, который находится в них в форме цианидов [5, 9, 10]. Исследуя кинетику растворения азота в расплавах системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, авторы [7] пришли к выводу, что скорость растворения азота пропорциональна квадратному корню из произведения активности оксида кальция на парциальное давление азота. В работах [3, 5–7] указывается, что растворимость азота в шлаках зависит от содержания в них углерода. В известной нам литературе нет данных о влиянии фтористого кальция на растворимость азота в шлаках. В то же время большинство флюсов, используемых для электрошлаковых технологий (ЭШТ), состоят из фтористого кальция (основа) с добавками глинозема, окиси кальция, магнезия и кремния.

Поэтому знание кинетики и термодинамики поглощения азота фтористым кальцием даст возможность оценить влияние последнего на растворимость азота в подавляющем большинстве флюсов для ЭШТ.

Исследования проводили по методике [5, 7]: плавил шлак в графитовом тигле с продувкой расплава азотом (рис. 1). Графитовый тигель нагревали в индукционной печи, при этом и тигель и индуктор помещали в асбоцементную камеру, продуваемую азотом. Благодаря этому повышалась стойкость графитового тигля. В нем расплавляли 50 г химически чистого фтористого кальция (температура расплава 1923 К).

Азот вдували в расплав через графитовую трубку. По ходу плавки в кварцевую трубку отбирали пробы для последующего определения содержания азота методом Кьельдаля [8].

На рис. 2 представлены кривые изменения концентрации азота и углерода во фтористом кальции в процессе плавки. Как видно, процессы обогащения шлакового расплава азотом и углеродом протекают одновременно. Обогащение углеродом происходит за счет растворения материала тигля, а азотом — из газовой фазы. При этом в первые 60 мин концентрация углерода почти не меняется, в то время как азота слабо возрастает. Затем содержание углерода начинает расти и достигает насыщения примерно через 2,5 ч после начала плавки. Количество азота при этом также возрастает, причем растет гораздо быстрее, но достигает насыщения также примерно через 2,5 ч. Одновременное увеличение концентраций углерода и азота, а также достижение насыщения, свидетельствует о том, что азот и углерод в шлаке связаны в одно

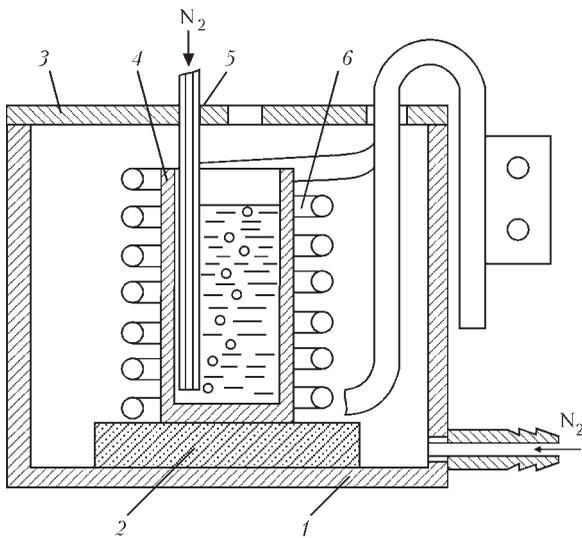


Рис. 1. Установка для проведения опытов: 1 — камера; 2 — огнеупорная подставка; 3 — крышка; 4 — графитовый тигель; 5 — графитовая трубка; 6 — индуктор

соединение, например, цианид или цианамид. Слабый рост содержания азота в первые 60 мин плавки объясняется тем, что углерод в исходном фтористом кальции находится в виде карбоната и азот не может образовывать с ним соединения.

По той же методике был выполнен ряд плавки фтористого кальция с различным содержанием углерода. Плавки продолжались 3,0...3,5 ч. Данные о количестве азота и углерода в шлаке после плавки приведены в табл. 1. Они свидетельствуют о том, что с увеличением содержания углерода повышается концентрация азота в шлаке.

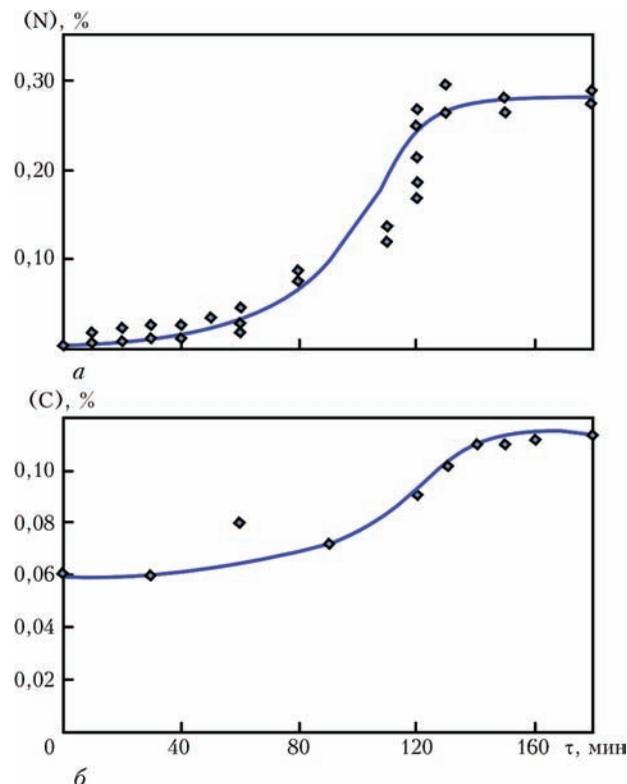


Рис. 2. Кинетические кривые изменения концентрации азота (а) и углерода (б) во фтористом кальции

Таблица 1. Содержание азота и углерода во фтористом кальции с добавкой углерода после плавки при $T = 1923 \text{ K}$, мас. %

Номер плавки	(C)	(N)
1	0,11...0,12	0,265...0,285
2	0,23...0,27	0,540...0,675
3	0,70...0,78	1,100...1,120

Для определения равновесной концентрации азота во фтористом кальции с различным содержанием углерода использовали методику плавления металла во взвешенном состоянии [11]. В электромагнитном поле подвешивали цилиндрический образец диаметром 8 мм и высотой 8 мм из армко-железа с 0,005 % азота. В центральной части образца высверливали углубление 4 мм, в которое помещали навеску фтористого кальция с содержанием 0,06 % углерода. Расплавленный шлак покрывал тонким слоем нижнюю часть капли жидкого металла, висящей в индукторе (температура металла 1923 К). Камеру продували азотом. Плавка продолжалась 5...6 мин, после чего образцы сбрасывались в медную клиновую изложницу. Определяли содержание азота в металле и шлаке. В металле оно достигало равновесия уже через 1,5 мин. Полученные пробы металла содержали 0,08...0,15 % азота.

Зависимость концентрации азота в шлаке от содержания углерода представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что опытные точки по результатам разных плавки достаточно хорошо укладываются на прямую линию, проходящую через начало координат. Эта прямая соответствует стехиометрическому соотношению азота и углерода в цианамиде. Образованием цианамид кальция объясняют возрастание содержания азота в шлаке авторы работы [3]. Выполненные опыты позволили установить количественную зависимость между равновесными концентрациями углерода и азота во фтористом кальции. Из результатов экспериментов также следует, что при отсутствии углерода азот во фтористом кальции не растворим, поэтому добавление его во флюсы, состоящие из окислов алюминия, кремния, кальция, снижает содержание азота в них.

Исследовано также содержание азота в исходных шлаках, выплавленных в 100-килограммовой дуговой электропечи с охлаждаемым металлическим кокилем (табл. 2).

Исследования показали, что содержание азота в исходных флюсах несколько повышается с уменьшением количества фтористого кальция, что совпадает с данными лабораторных исследований. Но при этом следует отметить, что содержание азота даже во флюсе УД-3 настолько низко, что он не переходит в металл при переплаве.

В той же флюсоплавильной печи проведен ряд плавки флюса АНФ-7 (система $\text{CaF}_2\text{-CaO}$). При этом изменяли содержание углерода во флюсе и продували расплав азотом через графитовую труб-

Таблица 2. Содержание азота в различных шлаках, выплавленных в 100-килограммовой дуговой печи и после электрошлакового переплава (ЭШП), мас. %

Флюс	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	(N) исходный	(N) после ЭШП
АНФ-1П	95	5	—	—	0,02	0,005 (0,003)
АНФ-7	80	20	—	—	0,11	0,007
АНФ-6	70	—	30	—	0,03	0,013
УД-3	10	40	20	30	0,03	0,031 (0,036)

Примечание. В скобках приведены результаты исследований, выполненных в Уральском политехническом институте проф. С. М. Чучмаревым [7].

Таблица 3. Влияние технологии выплавки на содержание углерода и азота в шлаке АНФ-7, мас. %

Условия отбора проб	(C)	(N)
Из флюса обычной выплавки, после выпуска из печи	0,11	0,007
Во время плавки флюса, через 30 мин после продувки азотом	0,14	0,005
Из флюса, продутого азотом, после выпуска из печи	0,11	0,007
Из флюса обычной выплавки с повышенным содержанием углерода, после выпуска из печи	0,25	0,016
Из флюса с повышенным содержанием углерода в момент плавки, через 30 мин после продувки	0,44	0,028
Из флюса с повышенным содержанием углерода, продутого азотом, после выпуска из печи	0,43	0,033

ку. Результаты анализа проб приведены в табл. 3, из которой следует, что с увеличением концентрации углерода количество азота во флюсе возросло. Продувка же расплава азотом на его содержание во флюсе не сказывается. Это говорит о весьма малой интенсивности поглощения азота жидким флюсом указанного состава.

На рис. 4 представлена зависимость между содержанием азота и углерода во флюсе АНФ-7. Пунктирная линия (1) соответствует стехиометрическому соотношению азота и углерода в цианамиде. Из рисунка видно, что концентрация азота в исходном флюсе (2) гораздо ниже равновесной и, следовательно, шлак не только не может явиться источником обогащения азотом металла, но даже может способствовать удалению из него этого газа.

Для более детальной оценки роли шлака в процессах адсорбции и десорбции азота из газовой фазы металлом в электрошлаковых технологиях необходима информация о его проницаемости и ее зависимости от состава шлака.

Выводы

1. Между равновесным содержанием азота и углерода в жидком фтористом кальции существует количественная зависимость. Предположительно азот и углерод связаны в цианомид кальция.

2. С увеличением содержания фтористого кальция во флюсах для ЭШП концентрация азота уменьшается.

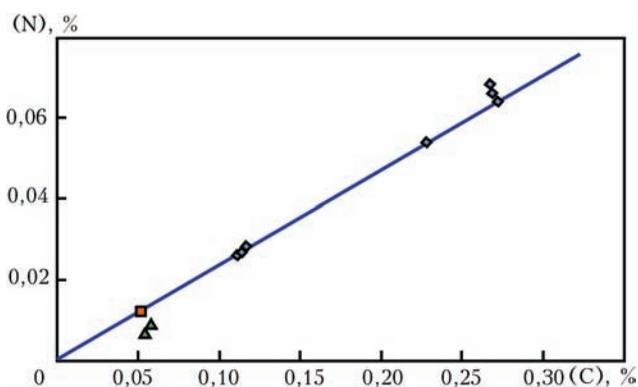


Рис. 3. Зависимость равновесной концентрации азота во фтористом кальции от содержания углерода (прямая соответствует соединению CaCN₂)

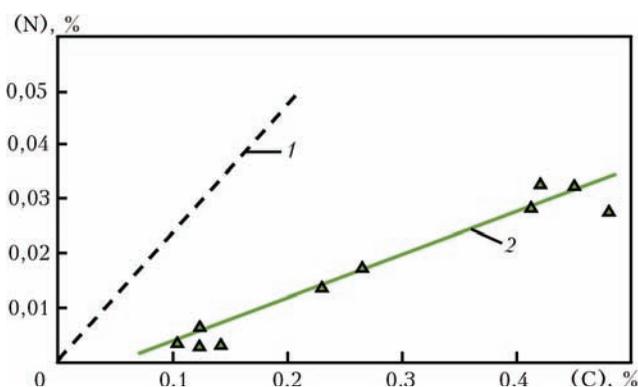


Рис. 4. Зависимость между концентрациями азота и углерода во флюсе АНФ-7, выплавленном в дуговой электропечи (описание 1, 2 см. в тексте)

3. Содержание азота во флюсах для ЭШП значительно ниже равновесного и повышается с увеличением количества углерода.

4. Необходимо исследовать азотопроницаемость шлаков, используемых в ЭШП.

Список литературы

- Еднерал Ф. П. (1956) Изменение содержания азота в ванне дуговой печи при шлаках различного состава. *Сталь*, **11**, 10–12.
- Явойский В. И. (1947) Передача газов металлу через переплавленные шлаки. *Там же*, **9**, 9–12.
- Ершов Г. С., Орлов Ю. Г. (1965) Поведение азота в шлаковой и металлических фазах при выплавке легированных сталей. *Изв. АН СССР. Металлы*, **6**.
- Ершов Г. С., Яковлев Н. Ф., Малиновский Е. И. (1968) Газы во флюсах и сталях при электрошлаковом переплаве.

- ве. *Производство и исследование сталей и сплавов*. Москва, Metallurgiya, сс. 18–21.
5. Камышев В. М., Есин О. А., Чучмарев С. К. (1964) Растворимость азота в безжелезистых шлаках. *Изв. вузов. Черная металлургия*, 7, 24–28.
 6. Орлов Ю. Г., Филиппов С. И. (1967) Абсорбция и десорбция азота известково-глиноземистым шлаком. *Там же*, 7, 11–15.
 7. Чучмарев С. К. и др. (1964) Кинетика растворения азота в расплавленных безжелезистых шлаках. *Там же*, 9, 21–23.
 8. Лев И. Е., Покидишев В. В., Лазарев Б. Г., Мицкевич Н. С. (1987) *Анализ азотосодержащих соединений в сплавах железа*. Москва, Metallurgiya.
 9. Новохатский И. А. (1975) *Газы в окисных расплавах*. Москва, Metallurgiya.
 10. (1985) *Атлас шлаков*. Справ. изд. Москва, Metallurgiya.
 11. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М. (1989) *Водород и азот в металлах при плазменной плавке*. Киев, Наукова думка.
 3. Ershov, G.S., Orlov, Yu.G. (1965) Nitrogen behavior in slag and metal phases in melting of alloyed steels. *Izv. AN SSSR. Metallurgy*, 6 [in Russian].
 4. Ershov, G.S., Yakovlev, N.F., Malinovsky, E.I. (1968) Gases in fluxes and steel in electroslag remelting. In: *Production and examination of steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya, 18–21 [in Russian].
 5. Kamyshev, V.M., Esin, O.A., Chuchmarev, S.K. (1964) Solubility of nitrogen in iron-free slags. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, 7, 24–28 [in Russian].
 6. Orlov, Yu.G., Filippov, S.I. (1967) Absorption and desorption of nitrogen by lime-aluminous slag. *Ibid.*, 7, 11–15 [in Russian].
 7. Chuchmachev, S.K. et al. (1964) Kinetics of dissolution of nitrogen in molten iron-free slags. *Ibid.*, 9, 21–23 [in Russian].
 8. Lev, I.E., Pokidishev, V.V., Lazarev, B.G., Mitskevich, N.S. (1987) *Analysis of nitrogen-containing compounds in iron alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 9. Novokhatsky, I.A. (1975) *Gases in oxide melts*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 10. (1985) *Atlas of slags*: Refer. Book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 11. Grigorenko, G.M., Pomarin, Yu.M. (1989) *Hydrogen and nitrogen in metals in plasma melting*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

References

РОЗЧИННІСТЬ АЗОТУ У ФЛЮСАХ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Г. М. Григоренко, Р. В. Козін

Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Вивчено поглинання азоту з газової фази шлаками, які використовуються в електрошлакових технологіях, а також термодинаміку та кінетику поглинання азоту фтористим кальцієм, який є складовою всіх шлаків. Встановлено взаємозв'язок між вмістом азоту та вуглецю в розплаві фтористого кальцію. Описана методика завислої каплі, яка застосовувалась при дослідженні розчинності азоту у флюсах. Визначено рівноважний вміст азоту. Наведено дані щодо вмісту азоту в деяких флюсах після виплавки та електрошлакового перепау, а також вуглецю та азоту у флюсі АНФ-7, який був виплавлений в дуговій флюсоплавильній печі за різних умов плавки та продувки. Проаналізовано результати досліджень, які показали, що азот у флюсах для електрошлакових технологій ймовірно знаходиться у вигляді сполуки CaCN_2 . Показано, що флюси які містять значну кількість фтористого кальцію, відрізняються низькою концентрацією азоту та не можуть бути джерелом збагачення металу азотом, та можливо можуть сприяти видаленню з нього газу. Бібліогр. 11, табл. 3, іл. 4.

Ключові слова: азот; вуглець; розчинність; метал; шлак; флюсоплавильна піч; електрошлакова технологія; електрошлаковий перепад

NITROGEN SOLUBILITY IN FLUXES FOR ELECTROSLAG TECHNOLOGIES

G. M. Grigorenko, R. V. Kozin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Absorption of nitrogen from a gas phase by slags, which are used in electroslag technologies, was studied. The thermodynamics and kinetics of nitrogen absorption by calcium fluoride, which is a component of all the slags for electroslag technologies, were also studied. The relation between the content of nitrogen and carbon in calcium fluoride melt was established. Method of a weighted drop as applied to study the nitrogen solubility in all the fluxes was described. The equilibrium content of nitrogen was determined. Data are given about the nitrogen content in some fluxes after melting and after electroslag remelting. Data are given about carbon and nitrogen content in flux ANF-7, melted in arc flux melting furnace at different conditions of melting and blowing. The analysis of results of investigations showed that the nitrogen in fluxes of electroslag technologies is supposed to be in the form of CaCN_2 compounds. It is shown that fluxes, containing the large amount of calcium fluoride, are characterized by a low concentration of nitrogen and cannot be a source of metal enrichment with nitrogen during remelting, and possibly, can promote the gas removal from it. Ref. 11, Tabl. 3, Fig. 4.

Key words: nitrogen; carbon; solubility; metal; slag; flux melting furnace; electroslag technology; electroslag remelting

Поступила 21.02.2018

РОЛЬ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловьев, И. П. Лентюгов, В. А. Жданов

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнены эксперименты в стационарном и подвижном токоподводящем кристаллизаторе по изучению влияния глубины шлаковой ванны и ввода в нее разовых порций рабочего флюса на изменение тока наплавки. Установлено, что увеличение объема шлаковой ванны в стационарном токоподводящем кристаллизаторе не является технологическим приемом повышения ее температуры при неизменной величине напряжения источника питания. Разовая подача рабочего флюса при наплавке в подвижном токоподводящем кристаллизаторе может лишь кратковременно влиять на величину рабочего тока с последующим ее снижением до первоначального значения. Библиогр. 5, табл. 1, ил. 4.

Ключевые слова: стационарный и подвижной токоподводящий кристаллизатор; глубина шлаковой ванны; разовая подача флюса; ток наплавки

Основным источником тепловой энергии, необходимой для плавления электродного металла, а также нагрева наплавляемой поверхности изделий в водоохлаждаемых кристаллизаторах является шлаковая ванна.

В работе [1] подробно рассмотрены тепловой баланс шлаковой ванны при переплаве электрода большого сечения, характер его плавления в шлаке, пути распределения тока в плавильном пространстве и влияние рода тока на происходящие при этом процессы. Особое внимание уделено влиянию глубины шлаковой ванны на токораспределение. Установлено влияние ее и коэффициента заполнения кристаллизатора на соотношение токов, проходящих по стенке кристаллизатора и электроду. При переплаве с большим коэффициентом заполнения кристаллизатора от глубины шлаковой ванны существенно зависит плавление электрода.

Разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона секционный водоохлаждаемый токоподводящий кристаллизатор (ТПК), к одной из секций которого подведено напряжение, может использоваться в электрошлаковых технологиях наплавки (ЭШН) и переплава (ЭШП) с подачей в шлаковую ванну материалов различного типа. Это могут быть как электроды и нетокопроводящие заготовки различного сечения, так и присадки в дискретном виде либо в виде расплавленного металла [2–5]. Наиболее перспективно использование при плавлении в шлаковой ванне дискретной присадки.

В этом случае, вследствие отсутствия в шлаке электрода, токораспределение и тепловое состо-

яние шлаковой ванны определяется лишь током, проходящим через нее от токопроводящей секции кристаллизатора.

Поэтому в данной работе поставлена задача установить взаимосвязь между рабочим током электрошлакового процесса (током ТПК) и глубиной шлаковой ванны и тем самым оценить возможность увеличения температуры ванны не только за счет повышения вводимой в нее электрической мощности, но и путем регулирования данного технологического параметра.

Методика выполнения экспериментов состояла из двух этапов. Первоначально в стационарном гладкоствольном ТПК диаметром 180 мм с помощью графитового электрода (твердый старт) наводили шлаковую ванну такого объема, чтобы ее глубина была достаточной для электрического замыкания поддона и токопроводящей секции кристаллизатора. Расстояние L от поддона до токопроводящей секции кристаллизатора составляло 45 мм (рис. 1). В результате прохождения через шлак электрического тока ТПК и активного вращения ванны в горизонтальной плоскости стабилизировали ее тепловое состояние. При этом графитовый электрод извлекали из ванны (рис. 2). Далее путем дополнительной подсыпки флюса доводили уровень шлаковой ванны до верхнего торца графитовой футеровки токопроводящей секции (высота футеровки около 40 мм) (см. рис. 1). Этим достигались одинаковые начальные условия проведения всех запланированных экспериментов, т. е. подачу порций флюса (1 кг) осуществляли с одного уровня наведенной шлаковой ванны. Дальнейшее увели-

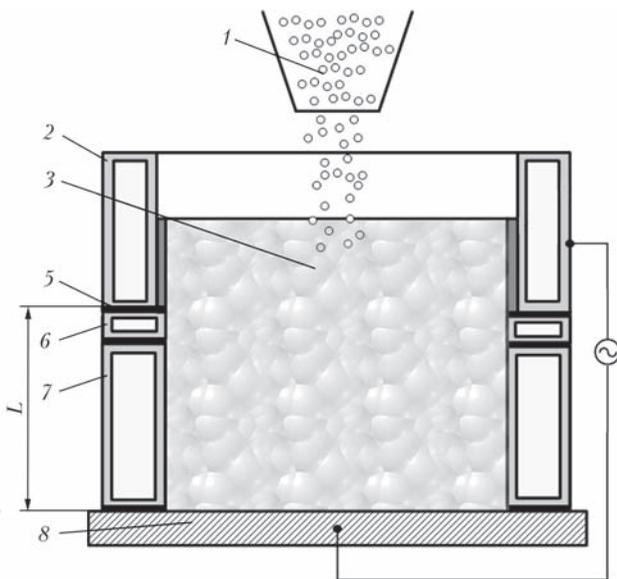


Рис. 1. Схема выполнения эксперимента: 1 — флюс; 2, 6, 7 — токоведущая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора соответственно; 3 — шлаковая ванна; 4 — защитная графитовая футеровка; 5 — изоляционная прокладка; 8 — поддон

чение ее объема и перемещение в ТПК происходило лишь по медной стенке секции. Подачу трех порций флюса АНФ-29 производили постепенно, чтобы сильно не захлаживать ванну. В течение всего процесса измеряли ток кристаллизатора I_k , напряжение источника тока $U_{ист}$, а также производили расчет электропроводности шлаковой ванны $G_{ш}$. Замеры и запись указанных электрических параметров проводили с помощью универсального модуля АЦП Е14-1440, ноутбука Lenovo (модель Ideal Pad 4560 с 64-разрядной операционной системой) и программного обеспечения «Power Graph» (рис. 3).

В экспериментах применяли как постоянный, так и переменный токи с источниками питания ВДМ-5000, ТШС-3000-1 и ТШП-10.

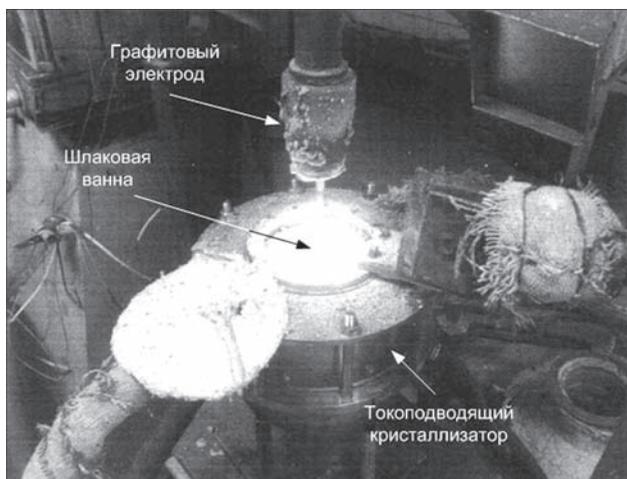


Рис. 2. Завершающий этап расплавления флюса в токоведущем кристаллизаторе диаметром 180 мм с извлеченным из шлаковой ванны графитовым электродом

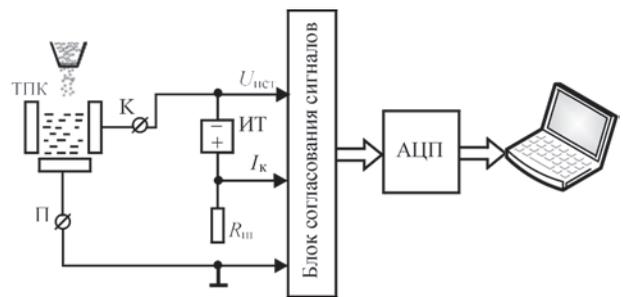


Рис. 3. Структурная схема электрических соединений при проведении экспериментов: ТПК — токоподводящий кристаллизатор; К и П — клеммы подсоединения токоведущей секции кристаллизатора и поддона соответственно; ИТ — источник постоянного тока; $R_{ш}$ — измерительный токовый шунт; $U_{ист}$, I_k — сигналы пропорциональные напряжению источника тока и току кристаллизатора соответственно; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

Благодаря использованию современной измерительной аппаратуры рассматривали весь процесс формирования шлаковой ванны (рис. 4).

В интервале времени от метки t_1 до t_2 происходит наведение шлаковой ванны, наблюдали рост ее температуры и электропроводности. После достижения уровня шлаковой ванны нижнего края графитового кольца токоведущего кристаллизатора (интервал $t_2 - t_3$) извлекали графитовый электрод из ванны. В это время наблюдали понижение электропроводности за счет замещения объема, занимаемого графитовым электродом, объемом разогретого шлака. В интервале $t_3 - t_4$ до момента засыпки в кристаллизатор первой порции флюса росла электропроводность шлака за счет нагрева ванны током, проходящим через токоведущий кристаллизатор. После засыпки первой порции флюса происходило незначительное охлаждение шлаковой ванны, которое сопровождалось понижением ее электропроводности. Вторую и

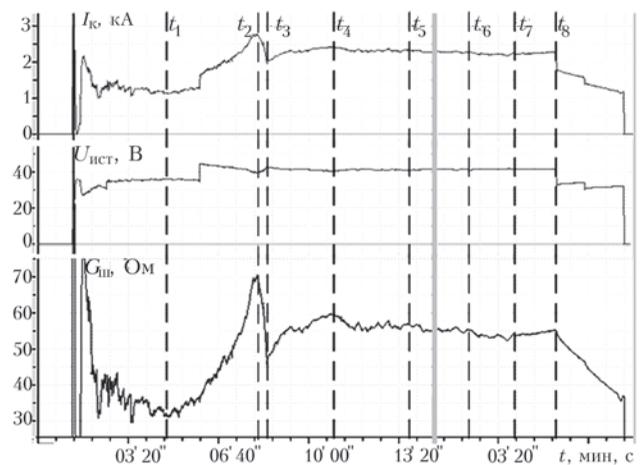


Рис. 4. Диаграмма распределения тока кристаллизатора, напряжения источника и электропроводности шлаковой ванны от момента твердого старта до стабилизации электрошлакового процесса (завершения процесса порционной подачи флюса)

третью порцию флюса засыпали в моменты времени t_5 и t_6 соответственно, после расплавления предыдущих порций. От момента времени t_4 до t_7 наблюдалось незначительное общее понижение температуры шлаковой ванны. Очевидно в шлаковую ванну поступало недостаточно электрической энергии для компенсации понижения тепла из-за введения порций флюса. После расплавления всего введенного во время эксперимента флюса, начиная от момента времени t_7 , происходил постепенный разогрев шлаковой ванны до момента t_8 , когда процесс подошел к завершению.

Из оценки диаграммы изменения электропроводимости и рабочего тока в шлаковой ванне от момента твердого старта до стабилизации ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе можно сделать следующие выводы:

постепенное извлечение графитового электрода из шлаковой ванны при ее касании токоведущей секции кристаллизатора первоначально приводит к падению величины тока примерно на 20 % (с 2,72 до 2,17 кА). По-видимому, величина той части тока, которая проходит через графитовый электрод, зависит от положения торца электрода в шлаковой ванне. При полном удалении электрода из шлака величина рабочего тока определяется только током кристаллизатора, благодаря чему наблюдается ее повышение до 2,43 кА;

при прохождении уровня шлаковой ванны графитовой футеровки заметного повышения величины тока не происходит (колебания тока не превышают 1 %) несмотря на то, что площадь соприкосновения шлака с поверхностью графитовой футеровки возрастает. Возможно, если бы расстояние L имело меньшее значение (10...15 мм), изменение величины тока было бы более значительным;

порционная подача флюса и превышение уровня шлаковой ванны верхнего края графитовой футеровки при соприкосновении с медной стенкой кристаллизатора также не повлияли на величину рабочего тока.

Исходя из полученных результатов, а также поставленной задачи изготовления длинномерных слитков (наплавленного слоя), когда химический состав шлаковой ванны (и частично ее объем) с течением времени изменяется, провели дополнительные эксперименты (2-й этап исследований) с использованием подвижного ТПК с уширенной верхней секцией диаметром 255/215 мм и флюса АНФ-32.

Уровень металлической ванны поддерживали постоянным благодаря индуктивному датчику уровня, ступень источника питания переменного тока во время наплавки также не изменяли. При этом эпизодически в шлаковую ванну подавали

Влияние дополнительного ввода в шлаковую ванну флюса АНФ-32 на изменение тока наплавки в токоподводящем кристаллизаторе

Период измерения тока, мин	Ток плавки, кА	Ввод флюса в шлаковую ванну, г
0	4,3	180
2	4,5	нет
5	4,4	нет
9	4,3	нет

небольшую порцию флюса примерно 180 г. Влияние дополнительной подачи флюса на изменение тока наплавки представлено в таблице.

Из таблицы следует, что разовая подача в шлаковую ванну свежего флюса сопровождается некоторым кратковременным повышением величины тока на 2...5 % с последующим снижением его до первоначального значения в течение 8...10 мин.

Выводы

1. Повышение температуры шлаковой ванны за счет увеличения ее глубины и роста рабочего тока (без изменения напряжения источника питания) нельзя рекомендовать в качестве технологического приема при выполнении наплавки (переплава) с использованием дискретной присадки в токоподводящем кристаллизаторе.

2. Разовый ввод в шлаковую ванну небольших порций свежего рабочего флюса способствует кратковременному росту тока с последующим снижением в течение 8...10 мин его величины до первоначального значения.

Список литературы

1. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.) (1976) *Электрошлаковые печи*. Киев, Наукова думка.
2. Кусков Ю. М. (2006) Ресурсосберегающая технология восстановления и изготовления деталей методом электрошлаковой наплавки. *Технология машиностроения*, **6**, 40–42.
3. Кусков Ю. М., Гордань Г. И., Богайчук И. Л., Кайда Т. В. (2015) Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, **5–6**, 34–37.
4. Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 6–11.
5. Медовар Б. И., Чекотило Л. В., Бойко Г. А. и др. (1971) Использование бестоковых расходных электродов с целью управления формой металлической ванны при ЭШП. *Спец. электрометаллургия*, **10**, 16–22.

References

1. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Kuskov, Yu.M. (2006) Resource-saving technology of restoration and manufacture of parts by electroslag surfacing method. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **6**, 40–42 [in Russian].

3. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Bogajchuk, I.L. and Kajda, T.V. (2015) Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, 5–6, 30–36.
4. Medovar, B.I., Chernets A.V., Medovar, L.B. et al. (1995) Electroslag surfacing with liquid filler metal. *Advances in Special Electrometallurgy*, 1, 5–9.
5. Medovar, L.B., Chekotilo, L.V., Bojko, G.A. et al. (1971) Use of current-free consumable electrodes for control of metal pool shape in ESR. *Spets. Elektrometallurgiya*, 10, 16–22 [in Russian].

РОЛЬ ШЛАКОВОЇ ВАННИ В ПРОЦЕСІ НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІВДІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловійов, І. П. Лентюгов, В. О. Жданов

Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано експерименти в стаціонарному і рухливому струмопідвідному кристалізаторі по вивченню впливу глибини шлакової ванни і введення в неї разових порцій робочого флюсу на зміну струму наплавлення. Встановлено, що збільшення об'єму шлакової ванни в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі не може бути технологічним прийомом підвищення її температури при незмінній величині напруги джерела живлення. Разове подання робочого флюсу при наплавленні в рухливому струмопідвідному кристалізаторі може лише короткочасно впливати на величину робочого струму з подальшим її зниженням до первинного значення. Бібліо-гр. 5, табл. 1, іл. 4.

Ключові слова: стаціонарний і рухливий струмопідвідний кристалізатор; глибина шлакової ванни; разова подача флюсу; ток наплавлення

ROLE OF SLAG POOL IN PROCESS OF SURFACING IN CURRENT-CARRYING MOULD

Yu. M. Kuskov, V. G. Solovjev, I. P. Lentjugov, V. A. Zhdanov

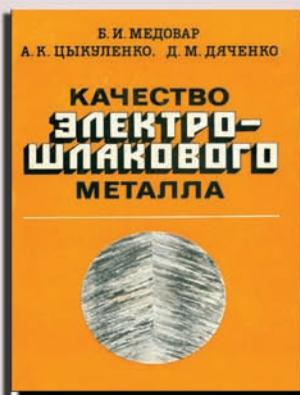
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Experiments in stationary and mobile current-carrying mould were made for study the effect of slag pool depth and adding of single portions of working flux into it on the surfacing current change. It was established that the increase in volume of slag pool in the stationary current-carrying mould is not a technological procedure of increasing its temperature at the power source unchanged voltage value. A single adding of working flux in surfacing in a mobile mould can only effect for a short time on value of operating current with subsequent its decrease to the initial value. Ref. 5, Tabl. 1, Fig. 4.

Key words: stationary and mobile current-carrying mould;; depth of slag pool; single flux adding; surfacing current

Поступила 02.03.2018



КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО МЕТАЛЛА / Медовар Б. И., Дыкуленко А. К., Дяченко Д. М.; Под ред. Патона Б. Е., Медовара Б. И.; АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев: Наук. думка, 1990. — 312 с. — ISBN 5-12-001659-6.

В монографии обобщены данные исследований металлургического качества и физико-механических свойств электрошлакового металла, получаемого современными способами электрошлаковой технологии. Дана краткая характеристика новых разновидностей этих способов. Освещены особенности кристаллизации электрошлакового металла и значение структурного фактора в повышении его качества. Рассмотрены технологические и механические свойства электрошлаковых сталей практически всех существующих классов. Приведены новые данные по качеству крупнотоннажных заготовок, изготавливаемых способами электрошлаковой технологии.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области металлургии и машиностроения; может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПА

И. В. Протокивиллов, А. Т. Назарчук, Д. А. Петров, В. Б. Порохонько

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковой печи камерного типа. Обоснован выбор технологической схемы ЭШП титана, описана технология изготовления расходоуемых электродов из губчатого титана, рассмотрены вопросы выбора флюсовой композиции и режимы газовой защиты плавильного пространства. Получены слитки титановых сплавов различные по форме (цилиндрические, полые, прямоугольные) и химическому составу. Показано, что как по качеству выплавляемого металла, так и по технико-экономическим показателям ЭШП может конкурировать с другими металлургическими процессами получения слитков титановых сплавов. Библиогр. 26, ил. 6, табл. 1.

Ключевые слова: камерный электрошлаковый переплав; титановые сплавы; расходоуемый электрод; слиток; флюс

Работами, проведенными в Институте электросварки им. Е. О. Патона еще в 60-х годах прошлого века, было показано, что однократная электрошлаковая плавка расходоуемых электродов позволяет получать технический титан ВТ1 и сплавы типа ОТ4 со свойствами, не уступающими металлу, выплавленному в вакуумно-дуговой печи [1, 2]. Наряду с преимуществами, среди основных недостатков ЭШП титана в то время считали отсутствие рафинирования металла от водорода и высокий, по сравнению с ВДП, удельный расход электроэнергии. С развитием технологии и оборудования для ЭШП доказано, что как качество титана, получаемого этим способом, так и затраты электроэнергии вполне сравнимы с показателями, которые достигаются при ВДП [3–6].

Среди преимуществ электрошлакового процесса, обуславливающих эффективность его применения для получения титановых сплавов можно выделить простоту и надежность используемого оборудования, гибкость технологических параметров плавки, высокое качество поверхности слитков, возможность получения слитков сложной формы, отсутствие неконтролируемого испарения компонентов сплава. Также необходимо подчеркнуть эффективность использования при ЭШП электромагнитных способов воздействия на кристаллизацию металла, способствующих повышению химической и структурной однородности выплавляемых сплавов [7–9].

Выбор технологической схемы ЭШП титана. Высокая химическая активность титана накладывает

серьезные ограничения на выбор технологических схем его выплавки. При нагреве выше 400...450 °С титан начинает активно взаимодействовать с атмосферными газами. Поэтому при ЭШП титановых сплавов необходимо обеспечить надежную защиту расплавленного металла и нагретых до высоких температур расходоуемого электрода и слитка от взаимодействия с атмосферными газами. Этого можно достичь только при использовании камерных печей ЭШП с предварительным вакуумированием плавильного пространства и последующей подачей инертного газа.

Недопустимость загрязнения металла углеродом и кислородом исключает возможность использования при ЭШП титана различных формирующих устройств и нерасходоуемых электродов на основе графита или других огнеупорных материалов.

К специфическим особенностям ЭШП титана следует также отнести необходимость использования солевых флюсов, не содержащих оксиды. Данные флюсы обладают высокой жидкотекучестью и резко изменяют показатели вязкости при снижении температуры (короткие флюсы), что значительно усложняет использование схем ЭШП с взаимным перемещением кристаллизатора и слитка.

Исходным сырьем при производстве слитков титановых сплавов является губчатый титан и легирующие добавки. Использование схем ЭШП, позволяющих переплавлять кусковую шихту без ее предварительного компактирования для изготовления расходоуемых электродов, могло бы существенно снизить затраты на производство

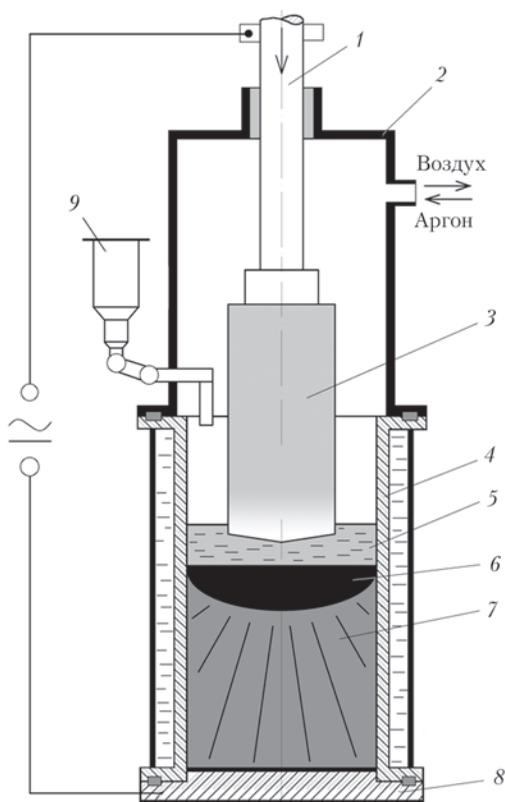


Рис. 1. Схема ЭШП расходуемого электрода в камерной печи: 1 — шток вертикального перемещения электрода; 2 — камера печи; 3 — расходуемый электрод; 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 — шлаковая ванна; 6 — металлическая ванна; 7 — слиток; 8 — поддон; 9 — бункер для подачи сыпучих компонентов

титановых слитков. Однако подача на зеркало шлаковой ванны кусковой шихты, состав которой существенно отличается по физическим свойствам, неминуемо приводит к формированию химической неоднородности в металле слитка.

Использование для выплавки титановых сплавов различных схем ЭШП с жидким металлом также сложнореализуемо ввиду необходимости его защиты от взаимодействия с атмосферными газами и использования камерных печей.

Таким образом, на наш взгляд, наиболее эффективной схемой ЭШП титановых сплавов на сегодняшний день остается классическая схема переплава расходуемого электрода в атмосфере инертного газа в стационарном водоохлаждаемом кристаллизаторе (рис. 1).

Изготовление расходуемых электродов. ЭШП можно использовать как рафинирующий переплав титановых слитков, полученных другими металлургическими способами, например, индукционной или дуговой гарнисажной плавками. Однако практический интерес представляет получение слитков титановых сплавов из исходной шихты — губчатого титана и легирующих компонентов. В этом случае шихту необходимо компактировать для получения расходуемых электродов.

Известны различные способы производства расходуемых электродов, основанные на процессах спекания шихты, холодного и горячего прессования на гидравлических прессах, прессования взрывом, изостатического, под током и др. [10–13]. Опыт показывает, что наиболее эффективным способом получения электродов для ЭШП титановых сплавов является полунепрерывное, порционное прессование на гидравлическом прессе в проходную пресс-форму (рис. 2).

Данный способ обеспечивает высокую производительность процесса прессования, возможность получения электродов необходимой длины, не загрязняет металл атмосферными газами и, что очень важно, обеспечивает равномерное распределение легирующих компонентов по высоте электрода, что является залогом получения однородных по химическому составу слитков.

Монтаж расходуемого электрода в печи осуществляется при помощи инвентарной головки, которая приваривается к торцу электрода. В работе [14] разработан способ контактной приварки инвентарной головки с использованием стандартного электрошлакового оборудования непосредственно



Рис. 2. Схема процесса прессования (а) и внешний вид полученных из губчатого титана электродов диаметром 75 и 100 мм (б): 1 — пуансон; 2 — приемная воронка; 3 — шихта; 4 — конусная, проходная пресс-форма; 5 — электрод

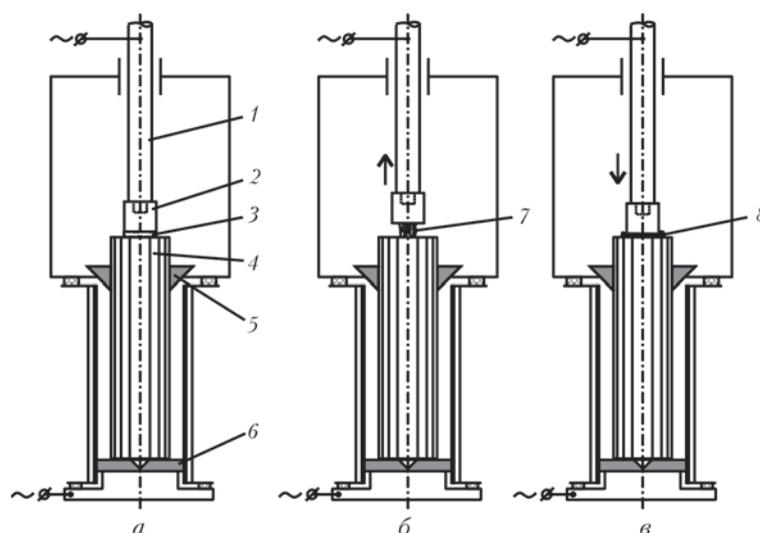


Рис. 3. Схема приварки инвентарной головки к расходуемому электроду (*а* — нагрев соединяемых поверхностей проходящим током; *б* — оплавление поверхностей электрической дугой; *в* — осадка): 1 — шток вертикального перемещения электрода; 2 — инвентарная головка; 3 — токопроводящая прослойка; 4 — расходный электрод; 5, 6 — центрирующие втулки; 7 — электрическая дуга; 8 — сварное соединение

в камере электрошлаковой печи (рис. 3). Сущность способа заключается в предварительном контактом нагреве свариваемых поверхностей электрическим током (рис. 3, *а*), оплавлении поверхностей дугой (рис. 3, *б*) и осадке, обеспечивающей сварку изделий (рис. 3, *в*). Указанные процессы осуществляются в форвакууме, что исключает насыщение металла сварного соединения и нагретых участков электрода атмосферными газами.

Разработанный способ обеспечивает соосность крепления электрода в кристаллизаторе и позволяет получать сварное соединение, выдерживающее механические и электрические нагрузки в процессе ЭШП (рис. 4). Важное преимущество предложенного способа заключается в отсутствии необходимости использования дополнительного оборудования и оснастки, в результате чего снижается трудоемкость и затраты на изготовление расходных электродов и технико-экономические показатели получения слитков в целом.

Выбор флюсовой композиции. Высокое сродство титана к кислороду исключает возможность использования при его плавке флюсов, содержащих оксиды. Поэтому при ЭШП титановых сплавов применяют бескислородные солевые флюсы, основу которых составляет чистый CaF_2 . В качестве добавок используют галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, а также металлический кальций [15–20].

Характерной особенностью солевых флюсов является их высокая электропроводность в расплавленном состоянии. К примеру, удельная электропроводность большинства оксидных флюсов при температуре 1500 °С не превышает 100...150 $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, а удельная электропроводность солевых флюсов при той же температуре дости-

гает 400...600 $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ [15, 16]. Такие высокие показатели электропроводности солевых флюсов снижают допустимые значения напряжения на шлаковой ванне и обуславливают высокий расход электроэнергии при ЭШП с их использованием.

Для понижения электропроводности флюса и повышения технико-экономических показателей ЭШП титана предложено в состав флюса на основе CaF_2 дополнительно вводить хлориды щелочноземельного металла и (или) комплексные соединения типа Na_3AlF_6 , MgTiF_6 и др. В расплавах таких флюсов образуются комплексные анионы типа MgF_4^{2-} , AlF_6^{3-} , которые характеризуются больши-



Рис. 4. Внешний вид сварного соединения инвентарной головки и прессованного из губчатого титана электрода, выполненного контактной сваркой

ми ионными радиусами с малой подвижностью, что снижает электропроводность системы.

С учетом таких подходов разработан ряд флюсов для ЭШП титана систем CaF_2 -8...30 SrCl_2 -2...5 Na_3AlF_6 и CaF_2 -3...44 MeCl_2 -0,5...3 MgTiF_6 , где MeCl_2 — хлорид щелочноземельного металла [21–23]. Использование данных флюсов при выплавке титановых сплавов обеспечивает стабильный электрошлаковый процесс, хорошее формирование поверхности слитка при снижении на 15...20 % удельного расхода электроэнергии (по сравнению с ЭШП под флюсом на основе 100 % CaF_2) [21].

Газовая атмосфера. Как было отмечено выше, для предотвращения взаимодействия титана с атмосферными газами его плавку необходимо осуществлять в защитной атмосфере инертного газа (обычно аргона). При этом плавильное пространство необходимо предварительно вакуумировать до остаточного давления не выше $1...5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Это позволяет удалить воздух и влагу из различных полостей в плавильном пространстве, неплотностей прессованного электрода и конденсата, который присутствует на стенках камеры. В процессе вакуумирования печи также можно осуществлять дополнительную дегазацию губчатого электрода путем его нагрева проходящим током, как показано в работе [24].

При подаче в камеру печи инертного газа его давление обычно выбирают несколько выше атмосферного (избыток 0,25...0,5 атм), что исключает натекание воздуха в камеру. Практический интерес также представляет ведение процесса ЭШП при пониженном давлении, так как при этом создаются условия для частичного удаления из металла водорода. Установлено, что нижний предел давления Аг в плавильном пространстве при плавке под флюсом АН-Т4 составляет 60...80 мм рт. ст. Дальнейшее понижение давления приводит к ухудшению стабильности электрошлакового процесса и вскипанию шлака.

В целом соблюдение указанных выше мер по предотвращению взаимодействия титана с атмо-

ферными газами обеспечивает получение титановых сплавов, газовый состав которых полностью удовлетворяет требованиям существующих стандартов.

Необходимо отметить, что сегодня помимо традиционных титановых сплавов, содержание атмосферных газов в которых строго ограничено, все большее распространение получают титановые сплавы, легированные кислородом. Камерный ЭШП является эффективным способом получения таких сплавов, обеспечивающим равномерное распределение кислорода в металле слитка [25]. При этом легирование можно осуществлять как путем добавления в шихту кислородсодержащих компонентов, так и непосредственно из газовой фазы, создавая в плавильном пространстве проточную атмосферу с аргонокислородной смесью.

Выплавка слитков. Необходимость ведения процесса плавки в герметичном пространстве существенно затрудняет возможность использования жидкого старта электрошлакового процесса. Поэтому при ЭШП титановых слитков для наведения шлаковой ванны применяется техника «твердого» старта. Для облегчения процесса «твердого» старта к торцу расходоуемого электрода приваривается конусный наконечник, а на поддон устанавливается затравка из прессованного губчатого титана.

После наведения шлаковой ванны и выхода на заданные режимы плавки осуществляется основной этап переплава расходоуемого электрода. В отличие от ЭШП сталей процесс плавки титановых сплавов характеризуется более низкими значениями электрического напряжения и более высокими — тока.

Важным технологическим преимуществом ЭШП титана является возможность получения слитков различной формы (цилиндрических, прямоугольных, полых) с высоким качеством формирования их боковой поверхности, в результате чего снижаются затраты на их механическую обработку (рис. 5). Причем при выплавке технического титана и низколегированных сплавов годный металл получается уже после первого переплава, что существенно повышает технико-эко-



Рис. 5. Слитки титановых сплавов, полученные способом ЭШП

Механические свойства титановых сплавов электрошлаковой выплавки						
Сплав	Состояние	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
BT1	Литой	440	360	28,0	57,0	186
BT6	Литой	940	890	9,3	24,0	48
BT6	Упрочненный	1020	920	11,0	38,0	63
BT22	Литой	970	940	8,5	21,7	33
BT22	Упрочненный	1300	1210	12,0	31,0	34
Ti-10-2-3	Литой	980	920	6,7	12,4	30
Ti-10-2-3	Упрочненный	1200	1120	13,0	36,5	50
ТС6	Упрочненный	1350	1180	12,0	25,0	—
Ti-50Ni (ат. %)	Литой	255	420	4,5	4,0	13
Ti-50Ni (ат. %)	Термообработанный	325	610	10,0	12,0	32
Ti-48Al-2Cr-2Nb (ат. %), $T_{исп} = 700^\circ\text{C}$	Литой	470	520	3,7	8,3	—

номические показатели ЭШП титановых слитков. При выплавке сложнoleгированных сплавов, как и при традиционном ВДП, для достижения требуемого уровня химической однородности металла требуется применение повторного передела.

Для повышения однородности сложнoleгированных титановых сплавов при ЭШП целесообразно использование электромагнитного воздействия на процесс первичной кристаллизации металла [7–9]. Суть способа заключается в периодическом силовом воздействии на жидкий металл и фронт кристаллизации слитка электромагнитными силами, формирующимися в расплаве в результате взаимодействия тока плавки с внешним магнитным полем. Для создания последнего используется соленоид, размещенный с наружной стороны кристаллизатора. Питание соленоида осуществляется в импульсном режиме, в том числе и за счет разрядов конденсаторов, в результате чего в рабочей зоне создаются мощные импульсные магнитные поля, способствующие интенсивному перемешиванию жидкого металла и измельчению кристаллической структуры слитка. Это позволяет получать литой металл с мелкозернистой однородной структурой, приближающейся к структуре деформированного металла (рис. 6).

Еще одним важным преимуществом ЭШП титановых сплавов в камерной печи является отсутствие избирательного испарения легирующих элементов из расплава в процессе выплавки слитков. В отличие от ВДП и ЭЛП электрошлаковый процесс характеризуется относительно низкотемпературным рассредоточенным источником нагрева, передел ведется при избыточном давлении инертного газа, зеркало металлической ванны покрыто расплавленным шлаком. Все это препятствует неконтролируемому испарению легирующих элементов с высокой упругостью пара (Cr, B, Sn, Al и др.) и позволяет выплавлять слитки различного химического состава — от технически чистого титана до многокомпонентных высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов, интерметаллидных сплавов систем TiNi, γ -TiAl и



Рис. 6. Макроструктура продольного сечения титанового слитка, выплавленного способом ЭШП с электромагнитным воздействием на металлургическую ванну

др. [3–6, 26]. Указанные титановые сплавы электрошлаковой выплавки обладают высокими механическими характеристиками и могут найти применение в различных отраслях промышленности и медицине (таблица).

Заключение

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены комплексные исследовательские работы по получению слитков титановых сплавов электрошлаковым способом. Разработаны процессы прессования расходуемых электродов из губчатого титана, созданы бескислородные солевые флюсы для ЭШП титановых сплавов, разработано оборудование и оснастка для выплавки титановых слитков различных размеров и формы. Разработаны способы электромагнитного воздействия на кристаллизацию металла, позволяющие усреднять химический состав выплавляемых сплавов и измельчать структуру литого металла.

Получены слитки титановых сплавов различной формы (цилиндрические, полые, прямоугольные) и различного химического состава. Показано, что как по качеству выплавляемого металла, так и по технико-экономическим показателям ЭШП может конкурировать с другими металлургическими процессами получения титановых сплавов.

Список литературы

1. Гуревич С. М., Дидковский В. П. (1963) Свойства технического титана и сплавов типа OT4, полученных электрошлаковой плавкой. *Автоматическая сварка*, **4**, 27–33.
2. Гуревич С. М., Дидковский В. П., Новиков Ю. К. (1963) Электрошлаковая выплавка слитков титановых сплавов. *Там же*, **10**, 37–42.
3. Компан Я. Ю., Протоковиллов И. В., Назарчук А. Т. (2008) Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов. *Теория и прак. металлургии*, **2**, 35–40.
4. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. и др. (2009) Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Современная электрометаллургия*, **1**, 3–11.
5. Протоковиллов И. В., Петров Д. А., Порохонько В. Б. (2016) Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо β -сплава ТС6. *Там же*, **3**, 16–20.
6. Протоковиллов И. В., Петров Д. А. (2017) Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. *Там же*, **1**, 9–14.
7. Компан Я. Ю., Протоковиллов И. В., Назарчук А. Т. (2008) Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей. *Матер. Междунар. конф. «Ti-2008 в СНГ»*, 18–21 мая 2008 г., Санкт-Петербург, сс. 96–99.
8. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протоковиллов И. В., Петров Д. А. (2012) Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. *Современная электрометаллургия*, **2**, 8–13.
9. Протоковиллов И. В., Назарчук А. Т., Порохонько В. Б., Петров Д. А. (2015) Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП. *Там же*, **4**, 3–8.
10. Андреев А. Л., Аношкин Н. Ф., Борзцовская К. М. и др. (1978) *Плавка и литье титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
11. Ивченко З. А., Лунев В. В. (2010) Изготовление и использование прессованных титановых брикетов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 90–92.
12. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я. и др. (1994) Переплав губчатых титановых расходных электродов способами ЭШП и ДШП. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3–4**, 7–11.
13. Жадкевич М. Л., Шаповалов В. А., Константинов В. С. и др. (2005) Получение расходных электродов компактированием титановой губки под током. *Современная электрометаллургия*, **3**, 64–67.
14. Протоковиллов И. В., Петров Д. А., Порохонько В. Б., Бабич Л. М. (2013) Изготовление расходных электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. *Там же*, **3**, 8–11.
15. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. (1988) *Сварочные шлаки*. Киев, Наукова думка.
16. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. (1989) *Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами*. Москва, Машиностроение.
17. Замков В. Н. (ред.) (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
18. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А. (2010) Выбор флюсов для ДШП при получении слитков титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*, **1**, 8–11.
19. Протоковиллов И. В. (2008) Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. *Там же*, **2**, 13–16.
20. Рябцев А. Д., Троянский А. А., Мастепан В. Ю. и др. (2003) Об электропроводности флюсов системы $\text{CaF}_2\text{—Ca}$. *Там же*, **1**, 3–4.
21. Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б., Гончаров И. А., Мищенко Д. Д. (2015) Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. *Там же*, **3**, 7–12.
22. Компан Я. Ю., Протоковиллов И. В., Петров А. М. (2003) *Флюс для магнитокероаной электрошлаковой плавки титановых сплавів*. Україна Пат. UA 55502, B23K35/36.
23. Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б. (2016) *Флюс для электрошлакового переплаву титанових сплавів*. Україна Пат. UA 110591 C2.
24. Протоковиллов И. В. (2012) Дегазация электрода спрессованного из губчатого титана в процессе вакуумирования камерной печи ЭШП. *Современная электрометаллургия*, **1**, 12–15.
25. Ратиев С. Н., Рябцева О. А., Троянский А. А. и др. (2010) Легирование титана кислородом из газовой фазы при камерном электрошлаковом переплаве титановой губки. *Там же*, **2**, 8–12.
26. Протоковиллов И. В., Петров Д. А. (2011) Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Титан*, **4(34)**, 40–44.

References

1. Gurevich, S.M., Didkovsky, V.P. (1963) Properties of commercial titanium and alloys of OT4 type produced by electroslag melting. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 27–33 [in Russian].
2. Gurevich, S.M., Didkovsky, V.P., Novikov, Yu.K. (1963) Electroslag melting of titanium alloy ingots. *Ibid.*, **10**, 37–42 [in Russian].
3. Kompan, Ya.Yu., Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T. (2008) Fine-grained ingots of multicomponent titanium alloys. *Teoriya i Prakt. Metallurgii*, **2**, 35–40 [in Russian].
4. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A. et al. (2009) Intermetallic heat-hardening of titanium alloys, produced by method of magnetically-controlled electroslag melting. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 1–11 [in Russian].
5. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. (2016) Electroslag melting and thermomechanical treatment of high-strength titanium pseudo β -alloy TS6. *Ibid.*, **3**, 16–20 [in Russian].
6. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2017) Structure and properties of high-strength titanium alloy Ti-10-2-3 of electroslag remelting. *Ibid.*, **1**, 9–14 [in Russian].
7. Kompan, Ya.Yu., Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T. (2008) Magnetically-controlled electroslag melting of titanium alloys with discrete effects of magnetic fields. In: *Proc. of Int. Conf. «Ti-2008 in CIS»* (18–21 May 2008, Saint-Petersburg), 96–99.
8. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2012) Possibilities of application of pulsed electromagnetic effects in electroslag processes. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 8–13 [in Russian].
9. Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. et al. (2015) Application of discharges of capacitors for control of metal crystallization in ESR. *Ibid.*, **4**, 3–8 [in Russian].

10. Andreev, A.L., Anoshkin, N.F., Borzetsovskaya, K.M. et al. (1978) *Melting and casting of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Ivchenko, Z.A., Lunev, V.V. (2010) Manufacture and application of compacted titanium briquettes. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metallurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 90–92 [in Russian].
12. Paton, B.E., Medovar, B.I., Saenko, V.Ya. et al. (1994) Production of sponge titanium consumable electrodes by ESR and ASR methods. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3–4**, 7–11 [in Russian].
13. Zhadkevich, M.L., Shapovalov, V.A., Konstantinov, V.S. et al. (2005) Production of consumable electrodes by titanium sponge compaction under current. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 58–61.
14. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B., Babich, L.M. (2013) Manufacture of consumable electrodes for magnetically-controlled electroslag melting of titanium. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **3**, 8–11 [in Russian].
15. Podgaetsky, V.V., Kuzmenko, V.G. (1988) *Welding slags*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
16. Kompan, Ya.Yu., Shcherbinin, E.V. (1989) *Electroslag welding and melting with controlled MHD-processes*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Ed. by V.N. Zamkov. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
18. Medovar, L.B., Saenko, V.Ya., Ryabinin V.A. (2010) Selection of fluxes for ASR in producing titanium ingots. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 8–11 [in Russian].
19. Protokovilov, I.V. (2008) Electroslag melting of halogenide oxygen-free fluxes. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 12–14.
20. Ryabtsev, A.D., Troyansky, A.A., Mastepan, V.Yu. et al. (2003) About electrical conductivity of fluxes of CaF₂ system. *Ibid.*, **1**, 2–3.
21. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B., Goncharov, I.A., Mishchenko, D.D. (2015) Investigation of physical and technological properties of salt fluxes for ESR of titanium. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 7–12.
22. Kompan, Ya.Yu. Protokovilov, I.V., Petrov, A.M. (2003) *Flux for magnetically-controlled electroslag melting of titanium alloys*. Pat. UA 55502, Ukraine, Int. Cl. B23K35/36 [in Ukrainian].
23. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2016) *Flux for electroslag remelting of titanium alloys*. Pat. UA 110591 C2 Ukraine [in Ukrainian].
24. Protokovilov, I.V. (2012) Degassing of electrode, pressed of spongy titanium, in the process of chamber ESR furnace evacuation. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 12–15 [in Russian].
25. Ratiev, S.N., Ryabtseva, O.A., Troyansky, A.A. et al. (2010) Titanium alloying with oxygen from gas phase in chamber-type electroslag remelting of titanium sponge. *Ibid.*, **2**, 8–12 [in Russian].
26. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2011) Production of alloys of Ti–Ni system with shape memory effect by magnetically-controlled electroslag melting method. *Titan*, **4**(34), 40–44 [in Russian].

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

I. V. Protokovilov, O. T. Nazarchuk, D. A. Petrov, V. B. Porokhonko

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто технологічні та металургійні особливості виплавки зливків титанових сплавів в електрошлаковій печі камерного типу. Обґрунтовано вибір технологічної схеми ЕШП титану, описана технологія виготовлення витратних електродів з губчастого титану, розглянуті питання вибору флюсової композиції і режими газового захисту плавильного простору. Отримано зливки титанових сплавів різні по формі (циліндричні, порожнисті, прямокутні) і хімічному складу. Показано, що як за якістю виплавленого металу, так і за техніко-економічними показниками ЕШП може конкурувати з іншими металургійними процесами отримання зливків титанових сплавів. Бібліогр. 26, іл. 6, табл. 1.

Ключові слова: камерний електрошлаковий переплав; титанові сплави; витратний електрод; зливки; флюс

TECHNOLOGICAL AND METALLURGICAL PECULIARITIES OF MELTING OF TITANIUM ALLOY INGOTS IN CHAMBER-TYPE ELECTROSLAG FURNACES

I. V. Protokovilov, A. T. Nazarchuk, D. A. Petrov, V. B. Porokhonko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Considered are technological and metallurgical peculiarities of melting the titanium alloys in chamber-type electroslag furnaces. Selection of technological diagram of ESR of titanium was grounded, technology of manufacture of consumable electrodes, made of sponge titanium, was described, the problems of selection of a flux composition and modes of melting space gas protection were considered. Titanium alloy ingots were produced in different shapes (cylindrical, hollow, square) and chemical composition. It is shown that by both the quality of metal melted and also the technical-economic characteristics, the ESR can compete with other metallurgical processes of producing the titanium alloy ingots. Ref. 26, Tabl. 1, Fig. 6.

Key words: chamber-type electroslag remelting; titanium alloys; consumable electrode; ingot; flux

Поступила 27.02.1018

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА, НАПЛАВЛЕННОГО ДРОБЬЮ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. Кусков, Ф. К. Биктагиров, Т. И. Грищенко, А. И. Евдокимов

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнено металлографическое исследование металла, наплавленного дробью из высокохромистого чугуна в токоподводящем кристаллизаторе. Установлено, что несмотря на особые в этом случае условия формирования металлической ванны структура периферийных зон наплавленного металла существенно не отличается от структуры, образующейся при ЭШП в обычном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Для получения однородной структуры наплавленного слоя без наличия в нем нерасплавившихся металлических включений необходимо выбирать электрические режимы наплавки с учетом массовой скорости подачи дроби и ее фракционного состава. Библиогр. 10, ил. 5.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка; токоподводящий кристаллизатор; наплавочная дробь; высокохромистый чугун; структура металла

В настоящее время высокохромистые чугуны (15...30 % Cr) являются наиболее распространенными высокоуглеродистыми износостойкими материалами, применяемыми в различных отраслях промышленности [1–3]. Это связано с особенностями их структуры. Главным признаком этой структуры является гетерогенность, т. е. одновременное присутствие в ней твердых включений (карбидов) и пластичной основы (матрицы), обладающей повышенными прочностными характеристиками. При оптимальном структурообразовании высокохромистые чугуны представляют собой естественные композиты, соответствующие по своей сопротивляемости абразивному изнашиванию принципу Шарпи [4].

Преимущество этих материалов, связанное с наличием в структуре большого количества (до 30 %) высокотвердых карбидов хрома ($HV = 14,5...16,0$ ГПа), является в то же время и серьезным недостатком. Последнее связано с тем, что при ремонте изделий из высокохромистых чугунов применять сварочно-наплавочные способы практически невозможно по причине появления в наплавленном металле дефектов (главным образом трещин). Более благоприятные условия для формирования наплавленного металла создаются при электрошлаковой наплавке (ЭШП). Как показала практика, наплавлять детали высокохромистым чугуном хотя и сложно, но все же возможно [5–7].

Лучшие условия для выполнения качественной электрошлаковой наплавки появились в результате использования токоподводящего кристаллизатора

(ТПК) и дискретной наплавочной присадки, в частности, дроби из высокохромистого чугуна [8, 9]. Основным отличием секционного токоподводящего кристаллизатора от обычного является наличие минимум двух секций, расположенных одна над другой и электрически изолированных. Верхняя — это токоведущая секция, через которую в шлаковую ванну подводится электрический ток, а нижняя — формирующая, в которой кристаллизуется в процессе охлаждения наплавленный металл.

Цель настоящей работы — оценка особенностей формирования структуры слоя металла высокохромистого чугуна, наплавленного дробью в ТПК.

По сути формирующая секция ТПК является аналогом обычного кристаллизатора с отводом тепла от расплавленного металла через водоохлаждаемые стенки. Поэтому можно предположить, что никаких особых отличий от обычного структурообразования, характерного для слитка ЭШП, происходить не должно. Однако в данном случае следует учитывать влияние на процесс кристаллизации токоведущей секции, вследствие чего имеет место специфическое распределение тока в шлаковой ванне. Если при электрошлаковом процессе в обычном кристаллизаторе тепловой центр шлаковой ванны располагается по оси электрода под оплавленным его торцом, то при плавке в ТПК основная доля тока протекает в пристенной области его внутренней поверхности. Вследствие этого именно в этой зоне в шлаке выделяется наибольшее количество теплоты. Это подтверждается как данными, полученными на расчетных моделях

[10], так и результатами реальных наплавки. Поэтому в пристенной области формируется более глубокая часть металлической ванны по сравнению с ее центральной частью и форма ванны напоминает сомbrero (рис. 1).

Иными словами, в пристенной области формирующей секции в металлической ванне происходят два противоположных процесса. С одной стороны, наблюдается наибольшее выделение теплоты и соответственно это снижает скорость кристаллизации расплавленного металла, а с другой, сохраняется обычное воздействие водоохлаждаемых стенок формирующей секции.

Исследования влияния особенностей электрошлакового процесса в ТПК на кристаллизацию наплавленного металла проводили по следующей методике. В ТПК диаметром 180 мм на металлической заправке, установленной ниже верхнего уровня формирующей секции, с помощью нерасходуемого электрода наводили шлаковую ванну (флюс АНФ-29). После касания шлаковой ванны токоведущей секции кристаллизатора электрод извлекали, а электрошлаковый процесс продолжался за счет прохождения тока через токоведущую секцию ТПК. После прогрева шлаковой ванны в нее дозатором подавали дробь высокохромистого чугуна диаметром 2,5...3,5 мм (2,4 % С, 27 % Cr).

Вследствие использования дроби с повышенной долей фракций большого диаметра (3,0...3,5 мм) и относительно невысоких температурных режимов наплавки сплавление основного и наплавленного металлов было исключено. Тем самым, металлографические исследования выполняли только на наплавленном металле, не подвергнутом влиянию основного металла.

Микроструктуру высокохромистого чугуна выявляли электролитическим травлением в 20 %-ном водном растворе хромового ангидрида при напряжении 15 В в течение 5 с. Анализ микроструктуры проводили с использованием оптического микроскопа. Для измерения микротвердости использовали прибор ПМТ-3 с нагрузкой 100 г, а твердости — прибор ТК-2М (метод Роквелла).

Металлографические исследования показали, что структура металла центральной (осевой) зоны наплавленного слоя соответствует структуре доэвтектического высокохромистого чугуна. Выделения первичного аустенита приближаются к ячеистой форме. Эвтектические колонии, имеющие равноосную (в виде розеток) и продолговатую (вытянутую) формы карбидов, располагаются в промежутках между аустенитными фазами (рис. 2). Микротвердость первичного аустенита составляет 5605 МПа, эвтектических колоний — 6291 МПа.

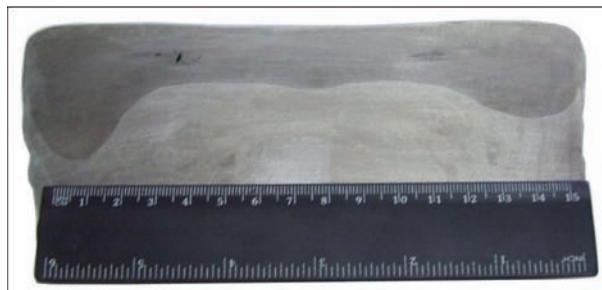


Рис. 1. Форма металлической ванны при ЭШН дробью высокохромистого чугуна в ТПК

В ряде мест наблюдаются локальные участки со структурой зерен аустенита, по границам которых располагаются мелкие пластинки карбидов (рис. 3, а). Размер этих участков составляет примерно 20...60 мкм. Встречаются также участки структуры, состоящие из матрицы и большого количества выделений карбидных кристаллов. Карбиды имеют форму мелких пластин, кристаллов гексагональной формы и располагаются в матрице хаотично (рис. 3, б). Микротвердость этих участков составляет 5605 МПа при макротвердости металла образца 42...46 HRC. Появление таких специфических участков как первого, так и второго типа обусловлено особенностями плавления гранул разного фракционного состава при имеющих место в опытах массовой скорости подачи дроби и электрических режимах наплавки. Это также подтверждает высказанные предположения о более низких температурных условиях плавления дроби и формирования металла в центральной части слоя.

Микроструктура металла в пристенной части наплавки также соответствует структуре доэвтектического высокохромистого чугуна (рис. 4). Однако все структурные составляющие в данном случае имеют меньшие размеры, чем в металле центральной части. Это означает, что, несмотря на более высокие температуры металлической ванны в пристенной области формирующей секции, скорость кристал-

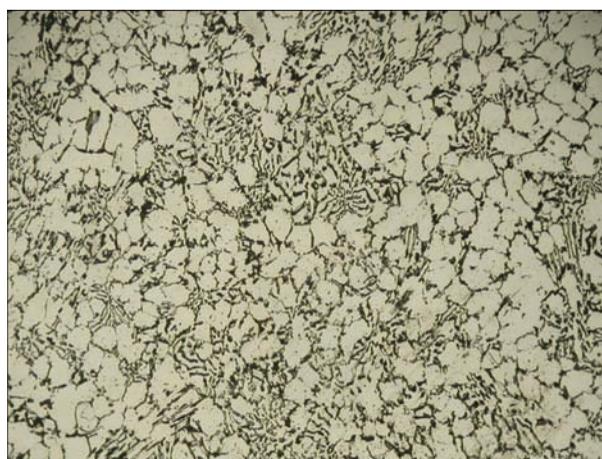


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) высокохромистого чугуна в центральной части наплавленного слоя

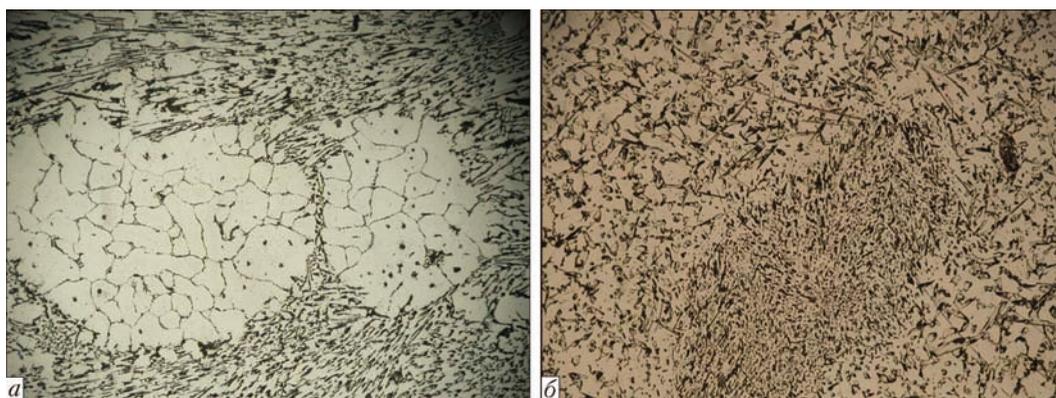


Рис. 3. Микроструктура ($\times 100$) локальных зон высокохромистого чугуна с крупнокристаллическим строением (а) и с мелкокристаллическим (б)

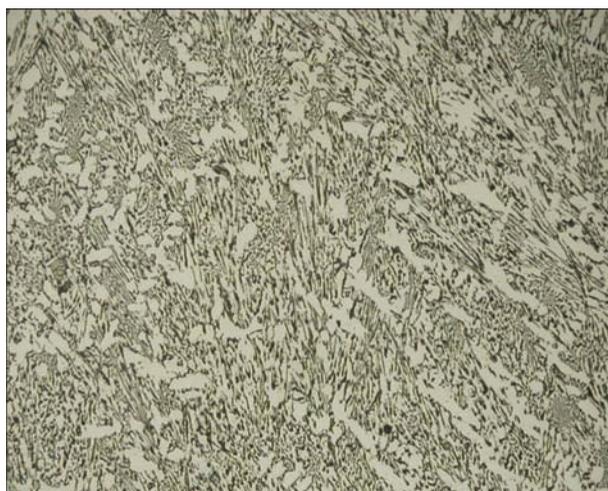


Рис. 4. Микроструктура ($\times 100$) высокохромистого чугуна в пристенной части наплавленного слоя

лизации здесь за счет охлаждающего влияния кристаллизатора выше по сравнению с осевой зоной. Никаких локально отличающихся участков с особой структурой в данном случае не отмечено.

Сама структура представляет собой дендриты первичного аустенита и прилегающие к ним колонии хромисто-карбидной эвтектики. В свою очередь эвтектика состоит из аустенитной матрицы, проросшей кристаллами карбидной фазы, имеющей вид веерообразно расположенных пластинок или розеток. Микротвердость дендритов аустенита составляет 5037...5605 МПа, т. е. примерно такая же, как у аустенита в структуре металла центральной части наплавленного слоя. То же можно сказать и относительно микротвердости эвтектических колоний (6291 МПа). Однако макротвердость этой части наплавленного слоя существенно превышает показатели для центральной части и составляет 48...49 HRC.

Так как толщина этой пристенной зоны относительно небольшая (менее 10 мм), то она либо не окажет значительного влияния на общую износостойкость наплавленного слоя, либо более высокая

твердость периферийной зоны может стать определяющим фактором в случае изнашивания только поверхностного слоя (боковой поверхности), особенно при незначительных величинах износа.

Результаты выполненных исследований показывают, что близость условий формирования структуры при плавке высокохромистого чугуна в ТПК и ЭШП принципиально позволяет использовать при разработке процесса наплавки в токоподводящем кристаллизаторе технологические и практические наработки, которые получены при ЭШН в обычном кристаллизаторе.

Также можно отметить, что выявленное при плавке в ТПК различие в макротвердости чугуна по центру и периферии наплавленного металла можно рассматривать как положительный фактор с точки зрения эксплуатации изделий, работающих в условиях торцевых ударных нагрузок и боковых изгибающих моментов, например, при наплавке рабочего инструмента (так называемых пик) гидромолотов различной формы и размеров.

Список литературы

1. Гарбер М. Е. (1972) *Отливки из износостойких белых чугунов*. Москва, Машиностроение.
2. Цыпин И. И. (1983) *Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства*. Москва, Металлургия.
3. Гаврилюк В. П., Тихонович В. И., Шалевская И. А., Гутько Ю. И. (2010) *Абразивостойкие высокохромистые чугуны*. Луганск, Ноулидж.
4. Жуков А. А., Сильман Г. И., Фрольцов М. С. (1984) *Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов*. Москва, Машиностроение.
5. Валиц К. А., Стойко В. П., Пономаренко В. П., Пасечник С. Ю. (1988) *Электрошлаковая наплавка молотков роторных дробилок коксохимического производства. Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в металлургической и горнорудной промышленности*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 24–25.
6. Киселева И. В., Дорохов В. В., Шварцер А. Я., Герасимов Е. А. (1989) *Использование электрошлакового обогрева при упрочнительно-восстановительной наплавке зубьев ковшей экскаваторов. Пробл. спец. электрометаллургии*, 3, 28–30.

7. Пономаренко В. П., Пасечник С. Ю., Стойко В. П., Шварцер А. Я. (1990) Прочность и износостойкость наплавленного высокохромистого чугуна, легированного титаном и марганцем. *Оборудование и материалы для наплавки*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, сс. 86–89.
8. Кусков Ю. М., Гордань Г. Н., Богайчук И. Л., Кайда Т. В. (2015) Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, 5–6, 34–37.
9. Кусков Ю. М., Сарычев И. С. (2004) Восстановительная электрошлаковая наплавка чугуновых валков стана 2000. *Сварочное производство*, 2, 39–43.
10. Томиленко С. В., Кусков Ю. М. (1999) Энергетические особенности электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, 2, 51–53.
4. Zhukov, A.A., Silman, G.I., Froltsov, M.S. (1984) *Wear-resistant castings from complexly-alloyed white cast irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Valits, K.A., Stojko, V.P., Ponomarenko, V.P., Pasechnik, S.Yu. (1988) Electroslag surfacing of rotary hammer crushers of by-product coke production. In: *Theoretical and technological principles of surfacing. Surfacing in metallurgical and mining industry*. Kiev, PWI, 24–25 [in Russian].
6. Kiseleva, I.V., Dorokhov, V.V., Shvartser, A.Ya., Gerasimov, E.A. (1989) Application of electroslag heating in hardening-restoration surfacing of excavator bucket teeth. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 3, 28–30 [in Russian].
7. Ponomarenko, V.P., Pasechnik, S.Yu., Stojko, V.P., Shvartser, A.Ya. (1990) Strength and wear resistance of deposited high-chromium cast iron alloyed with titanium and manganese. In: *Equipment and materials for surfacing*. Kiev, PWI, 86–89 [in Russian].
8. Kuskov Yu.M., Gordan G.N., Bogajchuk I.L. and Kajda T.V. (2015) Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, 5–6, 34–36.
9. Kuskov, Yu.M., Sarychev, I.S. (2004) Restoration electroslag surfacing of mill rollers 2000. *Svarochn. Proizvodstvo*, 2, 39–43 [in Russian].
10. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (1999) Energy specifics of electroslag process in current-supplying mould. *Avtomatich. Svarka*, 2, 51–53 [in Russian].

References

1. Garber, M.E. (1972) *Castings of wear-resistant white cast irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Tsy-pin, I.I. (1983) *Wear-resistant white cast irons. Structure and properties*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Gavrilyuk, V.P., Tikhonovich, V.I., Shalevskaya, I.A., Gutko, Yu.I. (2010) *Abrasion-resistant high-chromium cast irons*. Lugansk, Knowledge [in Russian].

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВИСОКОХРОМИСТОГО ЧАВУНУ, НАПЛАВЛЕНОГО ДРОБОМ В СТРУМОПІВДІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Ю. М. Кусков, Ф. К. Біктагіров, Т. І. Грищенко, А. І. Євдокимов

Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано металографічне дослідження металу, наплавленого дробом з високохромистого чавуну в струмопідвідному кристалізаторі. Встановлено, що не дивлячись на особливі в цьому випадку умови формування металеві ванни структура периферійних зон наплавленого металу істотно не відрізняється від структури, що утворюється при ЕШП в звичайному водоохолоджуваному кристалізаторі. Для здобуття однорідної структури наплавленого шару без наявності в ньому металевих включень, що не розплавлялися, необхідно вибирати електричні режими наплавлення з врахуванням масової швидкості подачі дробу і її фракційного складу. Бібліограф. 10, іл. 5.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення; струмопідвідний кристалізатор; наплавка; дріб; високохромистий чавун; структура металу

FORMATION OF STRUCTURE OF HIGH-CHROMIUM CAST IRON, SURFACED BY SHOTS IN CURRENT-CARRYING MOULD

Yu. M. Kuskov, F. K. Biktairov, T. I. Grishchenko, A. I. Evdokimov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Metallographic examination of metal, surfaced by shots of high-chromium cast iron in current-carrying mould, was carried out. It was established, that in spite of peculiar conditions of formation of metal pool in this case, the structure of periphery zones of deposited metal are not greatly differed from the structure, formed at ESR in conventional water-cooled mould. To produce the homogeneous structure of the deposited layer without the presence of non-melted metal inclusions in it, it is necessary to select the surfacing electric modes with account for a mass speed of shot feeding and its fractional composition. Ref. 10, Fig. 5.

Key words: electroslag surfacing; current-carrying mould; surfacing shot; high-chromium cast iron; metal structure

Поступила 05.03.2018

ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ МЕДНЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

Медные материалы для изготовления кристаллизаторов. В настоящее время общепризнаны че-



Рис. 1. Корпус кристаллизатора готовый для сварки

тыре вида медных материалов для изготовления кристаллизаторов (кокилей). Для кристаллизаторов, изготавливаемых по обычным технологиям, используется высокопроводящая ДНР- и НСР-медь. Благодаря низкому остаточному содержанию фосфора, НСР-медь имеет почти 100%-ную теплопроводность и поэтому ее часто применяют для изготовления фланцев и поддонов кристаллизаторов. Кокиль обычно изготавливают из ДНР-меди из-за ее хорошей свариваемости.

Кокили кристаллизаторов с использованием кованных заготовок изготавливают из НСР-меди или низколегированных медных материалов, таких как медь–серебро (CuAg) или медь–хром–цирконий (CuCrZr) (табл. 1). Так как небольшая добавка серебра (CuAg) хорошо влияет на теплопроводность меди, то кристаллизатор из этого материала обладает 100%-ной теплопроводностью. Добавка серебра повышает температуру рекристаллизации до 360 °С. Холодная формовка сплава CuAg для повышения его механической прочности способствует сохранению его свойств до температуры 360 °С при эксплуатации. В случае требования более высокой механической прочности предпочтительно применять упрочненный старением сплав CuCrZr. Более высокая прочность и температура

Таблица 1. Химический состав медных материалов для кристаллизаторов и их применение, мас. %

Сплав	Cu	Ag	Cr	Zr	P	Применение
Cu-DHP (SF-Cu)	> 99,9	–	–	–	0,015...0,04	Кокиль, изготавливаемый по обычной технологии
Cu-НСР (SE-Cu)	> 99,95	–	–	–	0,002...0,007	Кокиль, изготавливаемый ковкой из слитков и по обычной технологии
Cu-Ag 0,1 F 25	Остальное	0,08...0,12	–	–	0,001...0,007 для CuAg0,1P	Кокиль, изготавливаемый ковкой из слитков
CuCrZrF38	Остальное	–	0,3...1,2	0,03...0,3	–	Кокиль, изготавливаемый ковкой из слитков

Таблица 2. Физические и механические свойства медных материалов для кристаллизаторов

Сплав	Электропроводность		Теплопроводность, Вт/см·К	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_5 , %	HV 10	Температура рекристаллизации, °С
	%*	м/См·мм ²						
Cu-DHP (SF-Cu)	≥ 75	≥ 43	≥ 2,95	40	200	35	45	140...200
Cu-НСР (SE-Cu)	≥ 98	≥ 57	≥ 3,86	40	200	35	45	140...200
Cu-Ag 0,1 F 25	≥ 96	≥ 56	≥ 3,86	200...280	250...300	17...20	70...90	360
CuCrZrF38	≥ 78	≥ 45	≥ 3,06	≥ 270	≥ 370	18	125	570

*По отношению к отожженной меди.



Рис. 2. Кристаллизаторы, изготавливаемые по обычной технологии прямоугольного сечения

рекристаллизации сопровождается уменьшенной на 20 % проводимостью. В табл. 2 представлены физические и механические свойства всех материалов, применяемых для изготовления кристаллизаторов.

Основные стадии изготовления кристаллизатора по обычной технологии всегда начинаются со згибания горячекатаного медного листа в цилиндрическую или коническую форму (рис. 1). Особое внимание должно уделяться всем сварным швам. Швы длинного сварного корпуса всегда требуют 100%-ного рентгеновского контроля для избежания любых скрытых дефектов. Окончательный гелиевый контроль является наиболее строгим на герметичность кристаллизатора.

Имеется по крайней мере три варианта приварки фланца к корпусу кристаллизатора.



Рис. 3. Круглые кристаллизаторы, изготовленные по обычной технологии с одним продольным швом: материалы — Cu-DHP (SF-Cu) (а), Cu-HCP (SE-Cu) (б); размеры — $\varnothing 536 \times 3000$ мм (а), $\varnothing 1200 \times 3800$ мм (б); вес — 1316 кг (а), 3800 кг (б)

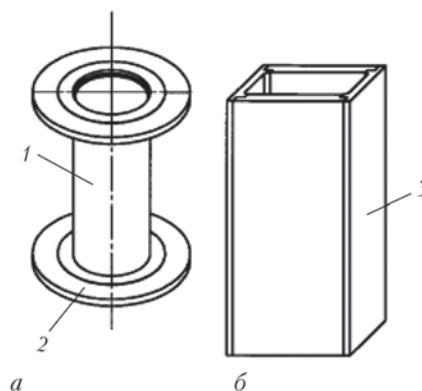
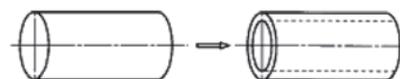


Рис. 4. Конструкции кристаллизаторов, изготовленных ковкой из слитков: а — кованый бесшовный (1) с приваренным фланцем (2); б — состоящий из четырех отдельных листов (3)

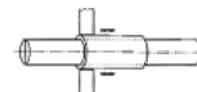


Рис. 5. Поковки для кристаллизаторов: а — изготавливаемых ковкой из слитка с прикованным фланцем (3,5 т); б — бесшовный кованый корпус (6,8 т)

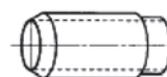
Прошивка слитка непрерывной разливки



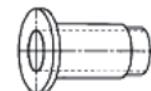
Ковка трубы кристаллизатора на оправке до основного размера



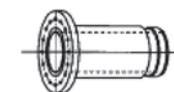
Механическая обработка трубы кристаллизатора (место для фланца и нижней части)



Приварка фланца



Окончательная обработка



Испытание цветными пенетрантами

Испытание воздухом (1,5...2,0 бар) и гелием

Контроль размеров

Рис. 6. Основные стадии производства круглых кристаллизаторов, изготавливаемых ковкой из слитков



Рис. 7. Бесшовный медный кристаллизатор, изготовленный ковкой из слитка с окончательной обработкой

Так как для кристаллизаторов, изготавливаемых по обычной технологии, требуется довольно небольшой расход медного материала, то они гораздо дешевле в изготовлении по сравнению с бесшовными, изготавливаемыми методомковки из слитков. Так как внутренняя поверхность сварного кокиля кристаллизатора совсем не обрабатывается, то надо придерживаться допуска в диаметре приблизительно 3...5 мм в зависимости от размера кристаллизатора. Проблемы деформации кристаллизаторов, изготовленных по обычной технологии, за многие годы эксплуатации решены передовыми способами сварки, исключаяющими остаточные напряжения путем понижения температуры предварительного нагрева перед сваркой. Толщина медной стенки кокиля в настоящее время увеличилась от 2...20 до 16...40 мм.

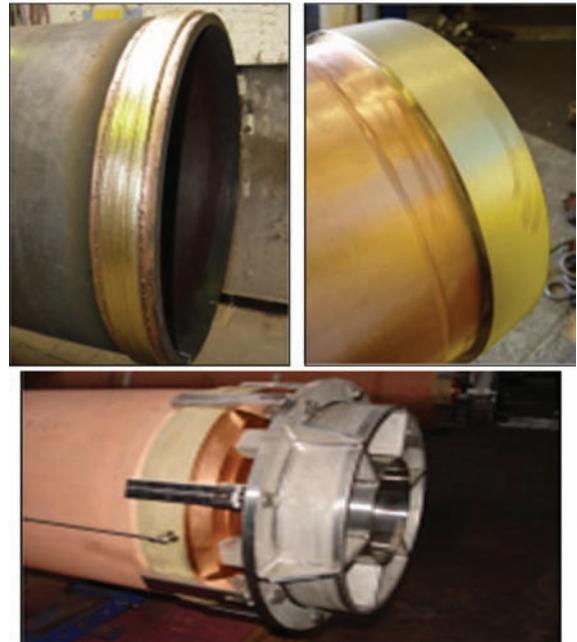


Рис. 8. Фиксация поддона к нижней части кокиля с помощью сварки

Медные кристаллизаторы прямоугольного сечения требуют сварку двух разрезанных секций (рис. 2).

Размер бесшовных кристаллизаторов, изготавливаемых методомковки из слитков, ограничивается имеющимися размерами заготовок. Большие и сверхбольшие кристаллизаторы должны изготавливаться конструктивно по обычной технологии, потому что трудно выплавить слитки необходимых размеров и изготовление их становится слишком дорогим (рис. 3).

Примеры конструкций кристаллизаторов для печей ВДП, ЭШП, ЭЛ, ПД и гарнисажной плавки. Основные конструкции кристаллизаторов, изготовленных ковкой из слитков показаны на рис. 4. Они могут состоять из четырех отдельных медных листов прямоугольной формы. Кристаллизаторы, изготовленные ковкой из слитков круглого сечения, имеют всегда бесшовный кованый кокиль. Может ли фланец быть выкован вместе с кокилем зависит от диаметра фланца (рис. 5). Кри-



Рис. 9. Кокили для ЭШП: а — с прикованным фланцем; б, в — цельнокованные



Рис. 10. Подвижные кристаллизаторы прямоугольного сечения
сталлизаторы с большим фланцем требуют его приварку.

На рис. 6 показаны основные стадии производства круглого кристаллизатора с бесшовным кокилем, изготовленным ковкой из слитка. Бесшовный кованный кокиль имеет всегда однородную структуру меди и самый низкий риск деформации при эксплуатации. Отсутствие сварного шва исключает возможность появления дефектов. Так как кристаллизатор, изготовленный ковкой из слитков, нуждается в механической обработке, то могут даваться небольшие допуски при производстве (рис. 7). Основным недостатком кристаллизатора, изготовленного ковкой из слитков — это более высокая стоимость из-за большего расхода медного материала и времени на обработку.

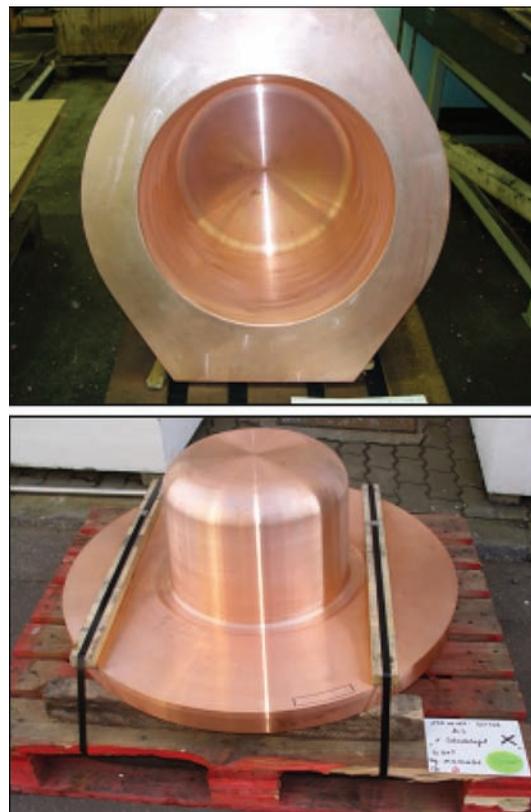


Рис. 12. Кристаллизаторы для печей гарнисажной плавки ВДП

На рис. 8 показана нижняя часть кристаллизатора, состоящая из медного поддона и опорной плиты из нержавеющей стали, прикрепленной зажимной системой.

В установках ЭШП часто используются подвижные кристаллизаторы вместо неподвижных (рис. 9, 10). Подвижные кристаллизаторы всегда имеют бесшовный кованный корпус. В некоторых случаях один фланец может приковываться (рис. 9, а).

Медные кристаллизаторы для печей гарнисажной плавки ВДП обычно цельнокованные. В случае, если медный фланец слишком большой, он должен привариваться к медной чаше (рис. 11, 12).

Довольно малые подвижные кристаллизаторы для электронно-лучевой (ЭЛ) плавки изготавливаются цельнокованными бесшовными, т.е. фланец



Рис. 11. Кристаллизаторы для печей гарнисажной плавки



Рис. 13. Бесшовные кованные кристаллизаторы для ЭШП (а, б — см. в тексте)



Рис. 15. Ремонт кокилей путем увеличения корпуса (удлинения)

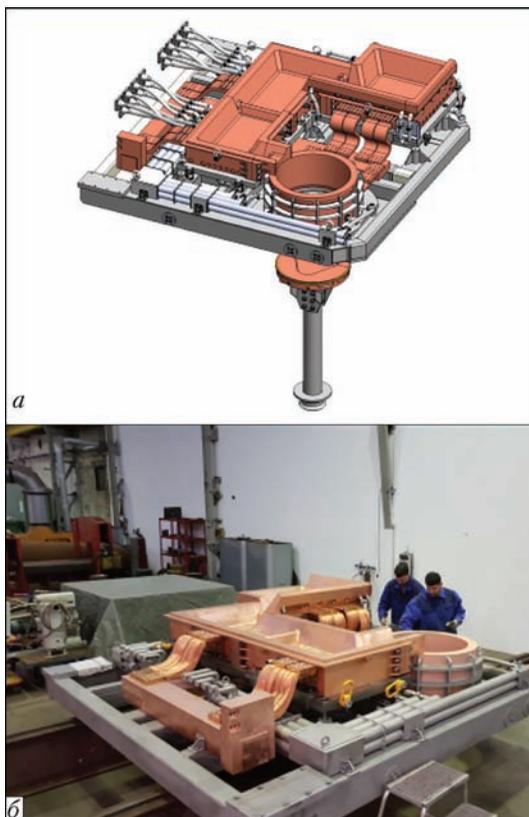


Рис. 14. Конструкция кристаллизатора с холодным подом для ПД печей: а — схема; б — внешний вид

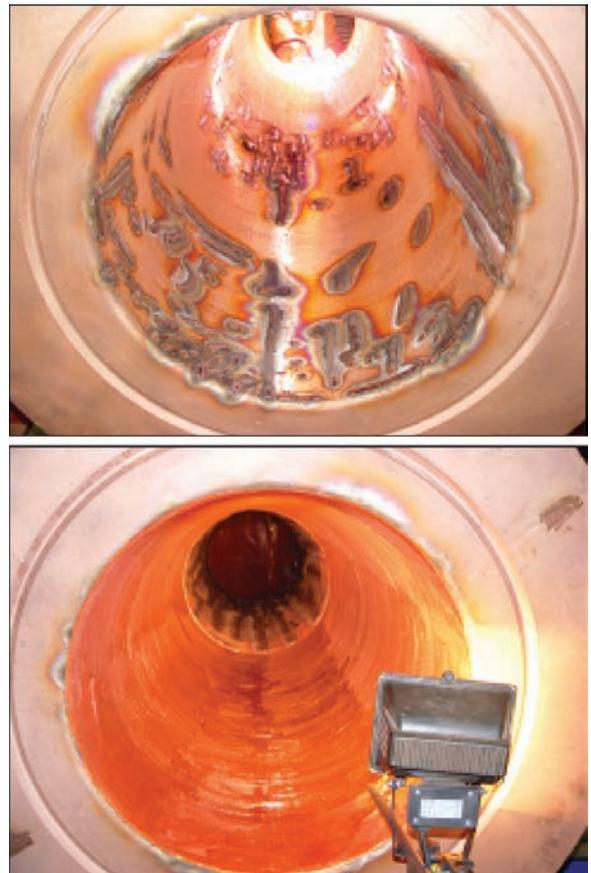


Рис. 16. Ремонт поверхности кокилей точечной сваркой



Рис. 17. Ремонт кокилей путем замены дефектных участков

всегда прикован. На рис. 13 показаны поковки (а) и готовый механически обработанный медный подвижной кокиль (б).

Специальные сплавы, такие как титановые, отливаются по каскадной системе, состоящей из плавильного и рафинирующего подов, до разливки в медную изложницу прямоугольного или круглого сечения. На рис. 14 показана современная система подов плазменно-дуговой (ПД) печи, которая предотвращает загрязнение примесями (окислы, включения и др.), оставшимися в подовой системе. Таким образом, они не могут ухудшить литой слиток. Высокие температуры жидкого металла, который непрерывно нагревается ЭЛ или ПД пушками, требуют всестороннее CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamic Modeling) для хорошо сбалансированного охлаждающего потока воды через все секции подовой системы для избежания нежелательных тепловых напряжений и деформаций довольно мягкой меди.

Технологии для ремонта кристаллизаторов.

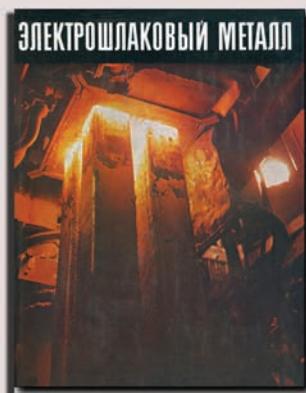
Наиболее распространенными дефектами медных кристаллизаторов при эксплуатации являются деформации и повреждение поверхности. Деформации можно снять путем применения гидравлических прессов, а в более трудных случаях путем вставки оправки в корпус кристаллизатора. Во всех случаях кристаллизатор должен соответственно нагреваться. В случае, если фланец можно снять, возможна повторная калибровка на гибочной машине.

Ремонт кокилей и при необходимости их удлинение может осуществляться дуговой сваркой в защитных газах (рис. 15).

Простые дефекты поверхности легко ремонтируются путем точечной дуговой сварки в защитных газах, а в случаях серьезного повреждения, необходимо заменить все дефектные участки (рис. 17).

Кристиан Ейлер

Саар-Металлверке ООО, Саарбрюккен, Германия



ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ МЕТАЛЛ / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.

Монография посвящена вопросам качества электрошлакового металла, т. е. металлических материалов и заготовок из них, получаемых методами электрошлаковой технологии: электрошлаковым переплавом, электрошлаковым литьем, электрошлаковой обработкой и всеми способами укрупнения заготовок.

Приведены сведения о химическом составе, структуре, механических, физико-механических и технологических свойствах электрошлакового металла: сталей практически всех существующих классов, жаропрочных сплавов, чугунов, ряда цветных, высокорекреационных и тяжелых металлов и сплавов.

Изложены данные о технико-экономической эффективности производства и применения электрошлакового металла.

Книга содержит справочные материалы, которые будут полезными специалистам-металлургам и машиностроителям, конструкторам, студентам технических вузов и многим другим специалистам, связанным с производством, потреблением и обработкой металлов.

СПЕЦИАЛЬНОЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ: ЭЛЕКТРОПЕЧИ КОМПАНИИ «ZHENWU»

Производство высококачественного оборудования является огромной движущей силой для разработки специальных сталей. Специальные стали разделяются на три уровня. Первый — сталь низкого уровня (высококачественная углеродистая конструкционная сталь); второй — специальная легированная сталь; третий — это высококачественные специальные стали (нержавеющая, инструментальная, штамповая и быстрорежущая). Основные направления применения сталей: рельсы для высокоскоростного железнодорожного и городского транспорта, морские техника и нефтедобывающее оборудование, оснастка судов, энергосберегающий экологический транспорт, ультравысоковольтные линии передач и др. Быстрое развитие современной техники выдвинуло более высокие требования к сталям, которые невозможно выполнить традиционными способами производства.

Suzhou Zhenwu Electric Furnace Co. — один из крупных китайских разработчиков и производителей оборудования и технологий, который после 30 лет работы имеет полный комплект специального металлургического оборудования (печей) для производства всех специальных сталей. Приведем некоторое из них.

Печь для электрошлакового переплава (ESR) (рис. 1)

Мощность: 1...100 т

Диаметр слитка: 100...2300 мм.

Применение: получение высокотемпературных сплавов, инструментальных сталей, валков, валов турбин, деталей самолетов и паровых турбин.

Печь для ЭШП является специальной плавильной установкой, в которой плавящийся электрод, погруженный в расплавленную шлаковую ванну, плавится джоулевым теплом, генерируемым при прохождении электрического тока через расплавленный шлак, затем расплавленные капли металла очищаются и рафинируются, проходя через расплавленный шлак и, наконец, кристаллизуются в слиток в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Благодаря функции удаления примесей расплавленным шлаком и условиям кристаллизации, металл ЭШП имеет хорошие свойства, такие как чистота, мелкая и равномерная структура, нет точечной и кольцеобразной сегрегации, сверхнизкое содер-

жание серы, а также небольших и растворимых примесей и т. д.

Печи ЭШП с двойным рабочим положением и высокой производительностью, разработанные компанией, имеют следующие преимущества:

- конструкция печи — рамочная ямочного типа, хорошей жесткости. Скорость переплава регулируют с помощью высокоточной электронной измерительной системы;

- печь однофазная, двухпозиционная, со снимаемой литейной формой, состоящей из кристаллизатора и нижнего водяного короба, имеет один электрод. Когда выполняется переплав одновременно может просходить подготовка и удаление слитка в разных положениях печи и таким образом удваивается производительность;

- применение электронной измерительной системы высокой точности дает возможность быстро рассчитывать и затем контролировать скорость плавки расходуемого электрода для получения оптимальной равномерной кристаллизации. Высококачественная продукция может быть получена, в частности, при переплаве высоколегированных сталей или ЭШП слитков большого диаметра;

- линия высокого напряжения на вторичной обмотке имеет параллельное расположение. Соединение между стойкой поднятия электрода и линией высокого напряжения осуществляется электрическими щеточными устройствами для уменьшения длины водоохлаждаемого кабеля, индуктивности и расхода энергии;

- скорость плавки и сопротивление шлака контролируются автоматически для обеспечения стабильного процесса переплава;

- скорость переплава регулируется для оптимизации и надежности процесса;

- герметичный защитный кожух с инертным газом устанавливается на входе в кристаллизатор для обеспечения качественной продукции.

Печь для вакуумной индукционной плавки (VIM) (рис. 2)

Мощность: 10...30000 кг

Применение: выплавка металлов и сплавов, регулировка состава сплавов и отливок, производство заготовок из высокотемпературного сплава, лигатуры, сплавов для электроники.



Рис. 1. Печи для ЭШП (а, б) и крупнотоннажный слиток (в)

**Вакуумная печь точного фасонного литья
для равноосных кристаллов
и направленных монокристаллов
(VPIC) (рис. 3)**

Мощность: 5...200 кг (VPIC); 200...500 кг (VIM)

Применение: отливка компонентов аэрокосмической техники, современных медицинских аппаратов, деталей для паровых турбин и др.

**Вакуумная печь точного литья в формы
(VPGC)**

Мощность: 2...10 кг

Применение: отливка деталей для турбонагнетателя и др.

**Вакуумная индукционная печь
для дегазации металла в вакууме
(VID) (рис. 4)**

Мощность: 1...50 т

Применение: обезуглероживание, дегазация, регулирование состава сверхнизкой углеродистой, нержавеющей, специальной сталей и алюминиевых сплавов.

**Печь для вакуумно-дугового переплава
(VARF) (рис. 5)**

Мощность: 0,5...15 т

Диаметр слитка: 70...1600 мм

Применение: выплавка активных металлов, таких как Ti/Zr и специальных сталей.

**Печь для вакуумно-дугового переплава
и центробежного литья
(VAR, CCF) (рис. 6)**

Мощность: 50...1500 кг

Применение: выплавка активных металлов Ti, Zr, рафинирование и отливка деталей паровых турбин и самолетов.



Рис. 2. Вакуумно-индукционные печи



Рис. 3. Вакуумная печь для точного фасонного литья



Рис. 6. Печь для ВДП и центробежного литья заготовок



Рис. 4. Вакуумно-индукционная печь для дегазации металла в вакууме



Рис. 7. Вакуумно-индукционная печь с холодным подом

**Вакуумная индукционная плавильная печь
с холодным подом
(VCCIM) (рис. 7)**

Мощность: 1...50 кг

Применение: плавка и литье активных металлов.

Френк Ли

Компания «Чженьву», г. Сучжоу, Китай



Рис. 5. Печь для вакуумно-дугового переплава

Подписано к печати 25.05.2018. Формат 60x84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 7,9. Усл. кр.-отг. 8,2. Уч.-изд. л. 9,3.
Печать ООО «ДИА», 03022, г. Киев, ул. Васильковская, 45.