

12/2025



ДОРОГИЕ МЕТАЛЛУРГИ, ЧИТАТЕЛИ И АВТОРЫ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ»!

Поздравляем Вас с наступающим Новым, 2026 годом!

Новый год — это праздник, с которым мы всегда связываем свои надежды на успешное выполнение намеченных планов, реализацию новых идей, достижение поставленных целей.

За прошедшие годы журнал занял и удерживает почетное место среди ведущих изданий металлургической отрасли промышленности и пользуется заслуженным авторитетом среди металлургов России и зарубежья.

Журнал знакомит читателей с новейшими достижениями в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, металлургии в машиностроении РФ и за рубежом, теоретическими, технологическими и практическими проблемами подготовки сырья к плавке, производства жидкого металла, получения слитков, литья и непрерывнолитой заготовки, переплавных процессов, термической и термомеханической обработки стали и сплавов, сварки, пайки, упрочняющих технологий и функциональных защитных покрытий, ресурсосбережения, а также с прогнозами развития науки и производства металлических материалов в рыночных условиях экономики.

Особое внимание уделяется проблемам качества выплавляемого металла на всех стадиях производства и современному металлургическому оборудованию. На страницах журнала выступают ведущие специалисты металлургических и машиностроительных предприятий, государственных научных центров, технических университетов, публикуются результаты диссертационных работ соискателей ученых степеней кандидатов и докторов технических наук. Российские металлурги и ученые постоянно направляют свои усилия на обеспечение устойчивого развития отечественной металлургической промышленности, которая по своим показателям в XXI веке стабильно находится в пятерке ведущих мировых производителей стали.

Несмотря на сложную политическую и экономическую ситуацию на мировом стальном рынке в существующих условиях формирования многополярного мира и кризисных явлений в мировой экономике, производители металлопродукции и ученые-металлурги постоянно совершенствуют и развивают производственно-хозяйственную и научную деятельность на металлургических предприятиях и тем самым вносят достойный вклад в развитие нашего общества.

В наступающем Новом году от всей души желаем Вам и Вашим близким благополучия, крепкого здоровья, большого счастья, удачи, дальнейших творческих успехов на личном и профессиональном уровнях!

Редакционная коллегия

ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал

Издается с мая 1998 г.

12/2025

*Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций
на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук*

Журнал переводит на английский язык и выпускает издательство "Pleiades Publishing Ltd." в виде приложений к журналу "Russian Metallurgy (Metally)", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, Astrophysics DataSystem (ADS), ChemWeb, EI-Compendex, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, OCLC, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions, Web of Science.

СОДЕРЖАНИЕ

Специальная электрометаллургия

Чуманов И.В., Матвеева М.А., Сергеев Д.В. Теория и практика введения специальных частиц для изменения химического состава металлической ванны при ЭШП 3

Григорьянц А.Г., Елизаветский К.С. Особенности современных аддитивных технологий лазерного селективного выращивания деталей из металлических порошков 9

Металлургическое и электротермическое оборудование

Бершицкий И.М., Васильев В.В., Кононов С.А., Орлов С.В. Инновационное развитие малотоннажного электросталеплавильного производства 20

Гавриш П.В., Ганин Д.Р., Чеботарев С.М. Модернизация чугунозаливочной машины гибкой модульной печи электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь». 27

Указатель статей, опубликованных в 2025 г. 35

ЖУРНАЛ «ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ»

Журнал издается с мая 1998 г.

В журнале публикуются статьи с результатами новейших достижений в области металлургии черных и цветных металлов в нашей стране и за рубежом, аналитические обзоры современного состояния и прогнозы развития различных направлений науки и производства, обзоры наиболее актуальных научных достижений и практических разработок по публикациям отечественной и иностранной печати. Особое внимание уделяется проблемам качества. Рассматриваются вопросы его обеспечения от создания до получения конечного материала на всех стадиях технологического процесса. Публикуется информация о патентах, проведении научных конференций, конгрессов, семинаров, симпозиумов и выставок по металлургии, об учебно-методических и справочных материалах.

Главный редактор И.О. Банных, д-р техн. наук, зав. лабораторией конструкционных сталей и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, чл.-кор. РАН

Зам. главного редактора С.В. Богданов, проф., д-р техн. наук, Государственный университет управления

Зам. главного редактора А.Л. Галиновский, проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ответственный секретарь А.А. Александров, канд. техн. наук, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Редакционный совет

Смирнов Л.А. — председатель, академик РАН, лауреат Госпремий СССР и РФ, научный руководитель АО «Уральский институт металлов»

Григорович К.В., проф., д-р техн. наук, академик РАН — зав. лабораторией диагностики материалов ИМЕТ РАН

Кузьмин М.Г., канд. техн. наук — генеральный директор АО «СКБ Сибэлектротерм»

Ламухин А.М., канд. техн. наук — главный металлург АО «Выксунский металлургический завод»

Оспенникова О.Г., д-р техн. наук — Советник Президента АО «ТВЭЛ»

Шильников Е.В., канд. техн. наук — генеральный директор АО «Металлургический завод “Электросталь”»

Шляпин А.Д., проф., д-р техн. наук — профессор кафедры материаловедения Московского политехнического университета

Редакционная коллегия

Абраимов Н.В., проф., д-р техн. наук

Беленький А.М., проф., д-р техн. наук

Бецофен С.Я., д-р техн. наук

Бигеев В.А., проф., д-р техн. наук

Бондаренко Ю.А., д-р техн. наук

Григорянц А.Г., проф., д-р техн. наук

Дуб В.С., проф., д-р техн. наук

Калита В.И., д-р техн. наук

Кармазин В.В., проф., д-р техн. наук

Кац Я.Л., канд. техн. наук

Кудря А.В., проф., д-р техн. наук

Латыпов Р.А., проф., д-р техн. наук

Либерман А.Л.

Лысенко А.П., доц., канд. техн. наук

Навасардян Е.С., проф., д-р техн. наук

Неменов А.М., канд. техн. наук

Нехамин С.М., д-р техн. наук

Ню Дж., проф. (Китай)

Овчинников В.В., проф., д-р техн. наук, акад.

Международной академии информатизации

Орлов В.В., д-р техн. наук, лауреат премии

Президента РФ

Парецкий В.М., проф., д-р техн. наук

Паршин В.М., д-р техн. наук

Райле В.Т., канд. техн. наук (Германия)

Ригина Л.Г., канд. техн. наук

Рошин А.В., д-р техн. наук (Казахстан)

Чуманов И.В., проф., д-р техн. наук

Шешуков О.Ю., проф., д-р техн. наук

Адрес редакции: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60

Телефон: +7 (495) 988-98-67

E-mail: elmetnait@mail.ru

По вопросам подписки обращаться по телефону +7 (495) 223-09-10; e-mail: market@nait.ru

Учредитель ООО «НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ»

<http://www.nait.ru>

При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал обязательна.

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.

УДК 669.187

Теория и практика введения специальных частиц для изменения химического состава металлической ванны при ЭШП

И.В. Чуманов, д-р техн. наук, проф., М.А. Матвеева,
Д.В. Сергеев

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», 456209, Челябинская обл., г. Златоуст,
Россия

E-mail: chumaniviv@susu.ru

DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-12-3-8

Статья поступила в редакцию 29.07.2025

После доработки 15.08.2025

Принята к публикации 17.08.2025

Показана возможность введения специальных частиц с поверхности расходующего электрода при электрошлаковом переплаве в жидкую металлическую ванну. Проведен анализ, обосновывающий возможность введения частиц в капли электродного металла, образующиеся на торце расходующего электрода при переплаве с применением технологии вращения электрода. Выполнена оценка размеров толщины пленки жидкого металла и образующихся капель и показано, что их размеры значительно превышают размеры специальных частиц. Установлено, что в случае перехода частицы с поверхности электрода в каплю она изолирована слоем жидкого металла от контакта с рафинирующим флюсом.

Отмечено, что при проведении экспериментальных переплавов с нанесенным покрытием, содержащим частицы карбида титана, происходит усвоение 55% от массы введенных частиц.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав (ЭШП), вращение расходующего электрода, специальные частицы, карбид титана.

Возможность применения электрошлакового переплава (ЭШП) для получения многослойных высококачественных слитков является перспективной и актуальной. Специальный слой можно формировать различными методами — заменой электрода в процессе переплава, переплавом составного по высоте электрода, добавкой специальных частиц, осуществляя их подачу непосредственно в плавильное пространство установки ЭШП [1, 2—5]. Только небольшое количество веществ способно выдержать воздействие агрессивной среды рафинирующего флюса — металлические и стальные порошки, твердые дисперсные частицы с плотностью, превышающей плотность флюса. Использовать вещества и соединения, проявляющие физико-химическую активность при темпера-

турах переплава или с меньшей плотностью, чем у флюса, считается технологически неоправданным, так как они не смогут преодолеть шлаковый пояс. Под эту категорию подходят упрочняющие твердые частицы, модификаторы, микролегирующие компоненты — их присадку следует осуществлять непосредственно в жидкий металл.

Использование ЭШП как глубоко рафинирующего процесса вторичного переплава для введения специальных частиц в металлическую ванну возможно, если избежать прямого контакта специальных частиц и флюса. Возможный способ введения добавок в жидкую металлическую ванну — это размещение их на расходуемом электроде в месте каплеобразования. В случае проведения ЭШП с применением технологии вращения расходуемого электрода изменяется условие течения пленки жидкого металла на торце оплавленного электрода, достигается радиальный характер течения и капли образуются по периметру электрода [6—8]. Следовательно, жидкий металл поверхностного слоя участвует в каплеобразовании и минимально контактирует с рабочим флюсом. Исходя из этого, если добавки, необходимые для изменения химического состава металлической ванны формируемого слитка, разместить на поверхности расходуемого электрода — они будут попадать непосредственно в каплю. И капля электродного металла выступает защитной капсулой, позволяющей доставить специальные частицы в металлическую ванну, минуя их контакт с рабочим флюсом. Вращение расходуемого электрода позволяет обеспечить радиальное течение пленки жидкого металла и является наиболее перспективным из известных способов для доставки специальных частиц в металлическую ванну.

Обосновать усвоение специальных частиц при ЭШП возможно, если учитывать степень рафинирующей способности переплава на границах взаимодействия жидкого

металла и флюса. В процессе удаления неметаллических включений из металла при ЭШП существует три поверхности, на которых происходит взаимодействие между жидким металлом и шлаком:

1. Пленка жидкого металла на торце переплавляемого электрода/флюс.
2. Капля электродного металла/флюс.
3. Ванна жидкого металла/флюс.

Исследования [9, 10] показывают, что основное удаление неметаллических включений происходит на границе флюс/пленка жидкого металла на торце переплавляемого электрода. При оценке степени рафинирования переплавляемого металла от неметаллических включений установлено, что до 80% включений, адсорбированных при переплаве, переходят в шлак с поверхности пленки жидкого металла на торце электрода и только 20% — из капель электродного металла при прохождении через шлак и при всплывании из ванны жидкого металла. По этой причине рационально использовать каплю электродного металла для переноса присадки специальных частиц различного состава в жидкую металлическую ванну. Предлагаемый способ исключает полный переход частиц, которые можно рассматривать как неметаллические включения, в шлак, так как они не попадают на границу с максимальной рафинирующей способностью.

Принципиальная возможность легирования переплавляемого металла с поверхности электрода заключается в сочетании следующих факторов:

1. Введение материала присадки в каплю электродного металла, формируемую на торце расходуемого электрода/шлак.
2. Удовлетворительное смачивание между железоуглеродистым расплавом и веществом корректирующей присадки.

В работах по дисперсионному упрочнению отливок градиентных функциональных материалов твердыми дисперсными

частицами показано хорошее усвоение карбидов и карбонитридов титана [11–13], карбидов вольфрама [14–18] и бора [19, 20]. Принципиальная возможность усвоения специальных частиц капель электродного металла будет определяться размером капли и средней толщиной пленки жидкого металла на торце при ЭШП с вращением расходуемого электрода.

1. Расчет максимального размера капли и толщины пленки жидкого металла, образующихся на торце расходуемого электрода

Максимальный диаметр отрывающейся капли в условиях динамического равновесия сил тяжести и поверхностного натяжения определяем по формуле [21]:

$$D_k = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot a_m \cdot F(\theta_k), \quad (1)$$

где $a_m = \sqrt{2 \frac{\sigma_{\text{м-шл}}}{g(\rho_m - \rho)}}$ — капиллярная постоянная металла; $F(\theta_k)$ — функция, зависящая от краевого угла смачивания θ_k при вершине капли. При изменении краевого угла $0 \leq \theta_k \leq 130^\circ$ функция $F(\theta_k) = 0,0123 \theta_k$. Для отрывающейся капли, имеющей максимальный диаметр, $\theta_k \approx 52,5^\circ$.

Плотность жидкой стали при увеличении температуры снижается. По данным Явойского В.И., для стали 30X13 зависимость плотности от температуры [22] рассчитывают по следующей формуле:

$$\rho_m(t) = 7027 - 0,684 \cdot (t - t_{\text{л}}), \text{ кг/м}^3, \\ \text{при } t_{\text{л}} = 1453^\circ \text{C}.$$

Оценить толщину металлической пленки на поверхности вращающегося электрода можно с использованием выражения, полученного профессором Чумановым И.В.:

$$\delta = \left[\left(\exp \frac{V_{\text{п}}}{\sqrt{\omega \cdot v_m}} - 1 \right) \cdot \frac{v_m}{\omega} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где $V_{\text{п}}$ — скорость плавления расходуемого электрода, м/с; v_m — коэффициент кинематической вязкости металла, м²/с; ω — угловая скорость вращения, рад/с.

2. Методология проведения эксперимента

Для практического подтверждения возможности введения специальных частиц, расположенных на поверхности расходуемого электрода, проведена серия переплавов электродов из стали 30X13 с нанесенным покрытием, содержащим специальные частицы — карбиды титана.

Переplав проводили на модернизированной полупромышленной установке А-550. Технологические параметры переплавов: диаметр расходуемого электрода ($D_{\text{э}}$) = 40 мм; диаметр кристаллизатора ($D_{\text{кр}}$) = 120 мм; флюс АНФ 6; сила тока (I) = 800 А. На расходуемые электроды наносили покрытие из смеси жидкого стекла (водный щелочной раствор $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)$) и порошка карбида титана. Покрытие наносили на электрод в области, которая после переплава сформирует специальный слой. В качестве эталона сравнения проведен переплав, в котором выполнено введение корректирующей добавки на шлак при вращении расходуемого электрода (переплав № 1-э). Скорость вращения электрода 64 об/мин.

Размер частиц TiC — 1–2 мкм, плотность — 4,93 г/см³. Плотность флюса АНФ-6 при температуре 1700 °С — 2,53 г/см³.

3. Результаты теоретических и экспериментальных данных

На рис. 1 графически представлена расчетная зависимость максимального диаметра отрывающейся капли от температуры по формуле (1). С ростом температуры диаметр растет, и это связано с увеличени-

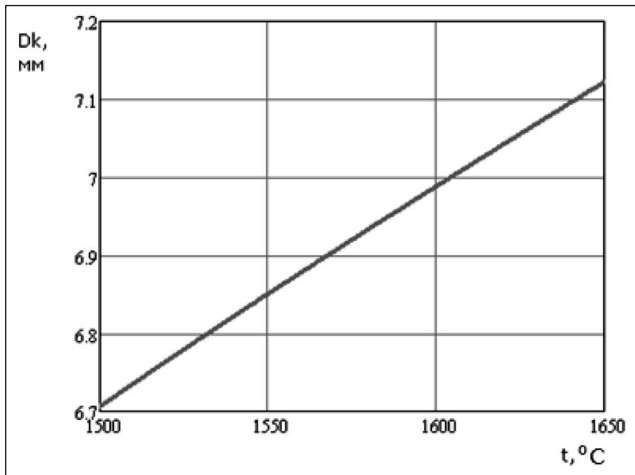


Рис. 1. Зависимость максимального диаметра отрывающейся капли в условиях динамического равновесия гравитационных и сил поверхностного натяжения от температуры для стали марки 30X13

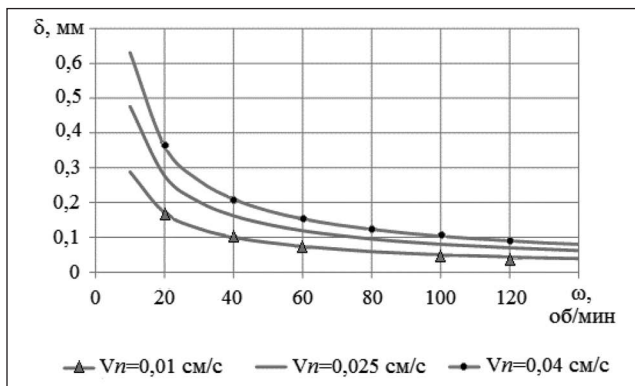


Рис. 2. Зависимость толщины пленки металла от скорости вращения электрода при его разных скоростях плавления

ем коэффициента межфазного натяжения. Влияние температуры на размер капель довольно сложно — с увеличением температуры коэффициент поверхностного натяжения стали увеличивается, а коэффициент поверхностного натяжения шлака

1. Химический состав специального слоя в слитках с введением корректирующей добавки TiC, % (мас.)

№ переплава	Содержание элементов, % (мас.)				
	C	Si	Mn	Cr	Ti
Электрод	0,431	0,245	0,450	12,817	0,001
1-э	0,443	0,241	0,433	12,721	0,124
2	0,438	0,293	0,446	12,684	0,295
3	0,440	0,286	0,432	12,725	0,291
4	0,451	0,270	0,432	12,702	0,310
5	0,441	0,252	0,421	12,683	0,334

уменьшается, что приводит к увеличению межфазного натяжения на границе жидкая сталь—флюс и возрастанию диаметра капель. Одновременно с ростом температуры вязкость и плотность шлака уменьшаются, что приводит к уменьшению сил, поддерживающих отрывающуюся каплю, а значит — к уменьшению диаметра капель.

Расчет толщины пленки жидкого металла проводили по формуле (2). Вращение расходуемого электрода при ЭШП приводит к уменьшению толщины пленки δ жидкого металла на оплавляемом торце (рис. 2) и обеспечивает периферийный отрыв капель металла.

Математический расчет в соответствии с параметрами экспериментального переплава показывает, что максимальный размер капель составляет 6,9 мм, а толщина пленки электродного металла для оптимального диапазона скоростей вращения электрода в 60—100 об/мин составляет 0,08—0,12 мм. И размер капли, и толщина пленки в десятки раз превышают размер частиц TiC, применяемого в экспериментальных перепла-

2. Технологические параметры переплавов при введении карбида титана с поверхности электрода

№ переплава	Скорость вращения электрода, об/мин	Масса присадки, г	Высота слитка, мм	Масса слитка, кг	% усвоения добавки
1-э	64	30	128	10,985	22,448
2	64	30	118	10,167	53,487
3	64	30	119	10,198	52,764
4	64	30	115	9,865	56,188
5	64	30	127	10,870	60,494

вах ($\approx 1-2$ мкм). Химический состав расходуемого электрода и специального слоя в экспериментальных слитках представлен в табл. 1. Подсчет усвоения карбида титана представлен в табл. 2.

Выводы

1. Приведено обоснование возможности введения специальных частиц, корректирующих химический состав металлической ванны с поверхности расходуемого электрода при его переплаве по технологии с вращением.

2. Размер капель и толщина пленки жидкого металла на торце расходуемого электрода в случае переплава с вращением позволяют захватить и доставить специальные частицы в металлическую ванну, минуя контакт с рабочим флюсом.

3. При условии удовлетворительного смачивания частиц карбида титана жидким металлом происходит их частичное усвоение каплями жидкого электродного металла и доставка в жидкую металлическую ванну. Средний процент усвоения специальных частиц с поверхности расходуемого электрода составляет 55,7% от массы введенной присадки. При прямом введении в плавильное пространство печи и переплаве с вращением расходуемого электрода усвоилось 22,4% от массы введенных карбидов, что можно объяснить активным перемешиванием шлаковой ванны и физико-химическим взаимодействием между металлом и шлаком.

4. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности корректировки химического состава металлической ванны в процессе ЭШП специальными частицами, нанесенными на поверхность расходуемого электрода, позволяют применить технологию ЭШП для получения высококачественных многослойных слитков. Возможность регули-

ровать химический состав и протяженность формируемых слоев открывает перспективу создания новых высококачественных металлических композиционных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00245, <https://rscf.ru/project/25-29-00245/>

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Цыкуленко А.К., Медовар Л.Б., Чернец А.В. Некоторые новые области применения электрошлаковой технологии // Проблемы специальной электрометаллургии. 2002. № 2. С. 9—11.
2. Кусков Ю.М. Электрошлаковый процесс без расходуемого электрода с использованием некомпактного присадочного материала // Проблемы специальной электрометаллургии. 1992. № 2. С. 28—32.
3. Пат. 2163269 РФ. Способ получения многослойных слитков электрошлаковым переплавом / И.В. Чуманов. Заявл. 06.08.1999. Опубл. 02.20.2001. 3 с.
4. Пат. 1420048 РФ. Способ легирования при электрошлаковом переплаве расходуемых электродов / Ю.М. Мухин. Заявл. 10.08.1986. Опубл. 08.30.1988. 4 с.
5. Кусков Ю.М. Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токопроводящем кристаллизаторе / Ю.М. Кусков // Проблемы специальной электрометаллургии. 2017. № 11. С. 40—45.
6. Huang X., Duan Y., Liu Z. and ets. Role of Electrode Rotation on Improvement of Metal Pool Profile in Electroslag Remelting Process // Metals. 2021. V. 1675. No 11. P. 56—64.
7. Чуманов В.И. Разработка технологии ЭШП с вращением расходуемого электрода с целью повышения производительности процесса и улучшения качества металла: Дис. ... на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Новокузнецк, 1984. 146 с.
8. Shi X., Chang L., Wang J. Effect of mold rotation on the bifilar electroslag remelting process // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2015. V. 22. No 10. P. 1033—1042.
9. Чуманов В.И. Технология электрошлакового переплава: учебное пособие. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. 243 с.

10. **Пятыгин Д.А., Чуманов И.В.** Удаление неметаллических включений при ЭШП на постоянном токе // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 7. С. 25—26.
11. **Kiviö M., Holappa L., Louhenkilpi S.** et al. Studies on Interfacial Phenomena in Titanium Carbide. Liquid Steel Systems for Development of Functionally Graded Material // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2016. V. 47 (4). P. 2114—2122.
12. **Kivio M., Holappa L., Yoshikawa T.** et al. Interfacial Phenomena in Fe / Stainless Steel—TiC Systems and the Effect of Mo // High Temperature Material Processes. 2014. V. 33 (6). P. 571—584
13. **Протопопов Е.В., Селезнев Ю.А., Черепанов А.Н.** Модифицирование металла нанопорошковыми материалами для повышения качества слывовой непрерывно литой заготовки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 8—11.
14. **Fernandes C.M., Oliveira F.J., Senos A.M.R.** Reactive sintering and microstructure development of tungsten carbide-AISI 304 stainless steel cemented carbides // Materials Chemistry and Physics. 2017. V. 193. P. 348—355.
15. **Chumanov I.V., Anikeev A.N., Sedukhin V.V.** Adding tungsten semicarbide to 08KH18N10T corrosion-resistant steel and its effect on the mechanical properties // Steel in Translation. 2022. V. 52. No 2. P. 129—133.
16. **Krishna A.R., Arun A., Unnikrishnan D.** et al. An investigation on the mechanical and tribological properties of alloy A356 on the addition of WC // Materials Today: Proceedings. 2018. V. 5. Is. 5. Pt. 2. P. 12349—12355.
17. **Zhang C., Zhang N., Fang J.** Study on the microstructure and properties of WC steel bonded carbide by composite electroslag remelting et al // Advanced Materials Research. 2014. V. 886. P. 92—96.
18. **Han Y., Zhang A.L., Yang L.** et al. Distribution of WC Particle in Cast Steel and its Effect on Abrasion Resistance // Materials Science Forum. 2014. V. 788. P. 638—646.
19. **Невар Н.Ф., Кукуй Д.М.** Пути повышения эксплуатационных характеристик литых изделий с использованием карбида бора // Литье и металлургия. 2012. № 3 (66). С. 127—130.
20. **Седухин В.В.** Влияние введения дисперсных тугоплавких частиц на механические свойства отливок при различных видах центробежного литья // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2020. № 19. С. 134—141.
21. **Дакуорт У.Э., Хойл Дж.** Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1973. 192 с.
22. **Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л.** Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974. 496 с.

Уважаемые авторы!

Со второго полугодия 2018 г. (с № 7/2018) статьям, опубликованным в научных журналах ООО «Наука и технологии», на основании договора с фирмой Crossref/NEICON присваивается индекс DOI.

Загрузку метаанных статьи в базу Crossref осуществляет сам автор по инструкции, приведенной на сайте <http://elpub.ru>. Необходимые для загрузки дополнительные данные и инструкции редакция передает автору по e-mail после выпуска очередного номера журнала.

Загруженный в Crossref индекс DOI следует указывать при цитировании статьи в списках литературы.

УДК 621.791.9

Особенности современных аддитивных технологий лазерного селективного выращивания деталей из металлических порошков

А.Г. Григорьянц, д-р техн. наук, проф., К.С. Елизаветский
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Баумана)», 105005, Москва, Россия

E-mail: mt12@bmstu.ru

DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-12-9-19

Статья поступила в редакцию 10.06.2025

После доработки 18.07.2025

Принята к публикации 25.07.2025

Показаны основные достижения в развитии аддитивных технологий селективного лазерного плавления (СЛП) металлических порошков для получения качественных изделий. Представлены дальнейшие направления развития технологий выращивания с использованием легирования порошковых металлов, получением новых композиционных материалов в процессе выращивания.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление (СЛП), порошки, композиционные материалы.

В настоящее время аддитивное производство металлических изделий осуществляют дуговой наплавкой проволочных материалов, плазменными технологиями аддитивного производства, электронно-лучевого производства с подачей присадочной проволоки и металлических порошков. Но наибольшее распространение в мировом развитии получили лазерные аддитивные технологии с исполь-

зованием металлических порошков. Различают селективное лазерное плавление (СЛП), в котором оплавленный слой получают перемещением лазерного луча по слою порошка, и коаксиальное лазерное плавление, в котором отдельный слой будущего изделия создают подачей порошка коаксиально лазерному лучу.

В данной статье рассматривают технологический процесс аддитивного производства методом СЛП. В основе метода находится расплавление порошка для создания слоя будущего изделия. Используют как одноконтентные, так и многоконтентные порошки, представляющие собой смесь порошков. Характерный фракционный состав порошка — 20—50 мкм [1]. Важным параметром частиц является сферичность. Разность частиц, измеренных в двух перпендикулярных плоскостях, не должна превышать 10%. Наиболее производитель-

ным, экономичным и эффективным способом получения порошков для СЛП является диспергирование расплава распылением (атомизация), с помощью которого получают 60—70% промышленных порошков.

Для аддитивного процесса СЛП предварительно создают трехмерную компьютерную модель изготавливаемой детали. Далее эту модель переводят в *STL*-формат для расчленения ее на слои. Подготовленную компьютерную модель подают на установку для выращивания детали. Оплавление порошка осуществляют лазерным лучом, сканирующим его поверхность. После каждого слоя оплавления подложку рабочей камеры опускают на глубину 20—100 мкм, немного больше толщины слоя модели для нивелирования процесса усадки расплавленного слоя. Процесс осуществляют в герметичной камере в среде инертного газа (аргон или азот) для предотвращения окисления при нагреве и расплавлении порошка.

В технологии СЛП применяют лазеры большой мощности. Наибольшее применение нашли волоконные лазеры с уровнем мощности излучения порядка 1 кВт.

В результате СЛП свойства полученного материала выращенного изделия зависят от полноты протекания процессов физического взаимодействия лазерного излучения с порошком. Процессы взаимодействия влияют на образование дефектов-пор, сфероидизации, трещин и остаточных напряжений. Схематично оплавление порошка в процессе СЛП показано на рис. 1.

Основным механизмом СЛП является полное плавление порошка под действием лазерного излучения на глубину, превышающую толщину слоя, для того, чтобы повторно расплавить часть отвержденного ранее материала.

Воздействие высококонцентрированного лазерного излучения на материал обеспечивает высокие скорости его нагрева и охлаждения. Гидродинамические процес-

сы в ванне расплава влияют на ее размер и форму, скорость охлаждения и термические процессы в расплавленной зоне и зоне термического влияния (ЗТВ). В свою очередь, от геометрии ванны зависят рост зерна и микроструктура материала получаемой детали. Градиент температур между головной и хвостовой частями ванны составляет порядка 10^2 — 10^4 °С/см, что стимулирует течение и перемешивание расплавленного металла. Это приводит к нестационарному движению границы раздела жидкость—твердое вещество даже при постоянной скорости сканирования лазерным лучом.

Плотность мощности лазерного излучения позволяет переплавлять частицы порошка, формируя сплошную плотную структуру. Отпадает необходимость в применении специальных легкоплавких компонентов и флюсов. СЛП дает возможность работать с порошками традиционных конструкционных материалов на основе железа, никеля, алюминия, меди, титана и ряда других.

Под действием сил поверхностного натяжения капля расплава может затягивать

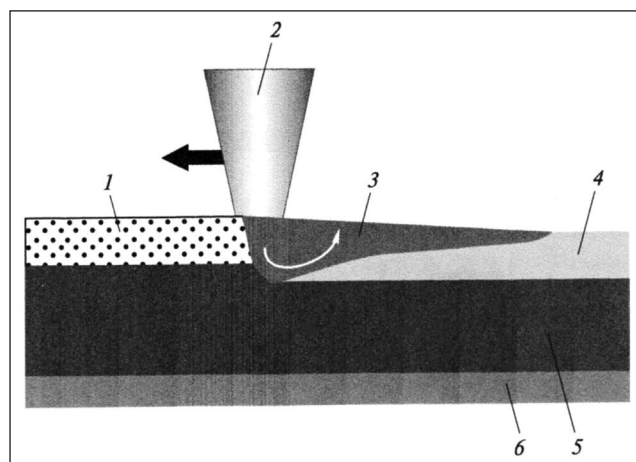


Рис. 1. Схема взаимодействия лазерного излучения порошком при процессе СЛП:

1 — порошок; 2 — лазерный луч; 3 — расплавленный порошок; 4 — застывший металл; 5 — наплавленный материал; 6 — подложка; ← — направление движения луча

в себя близлежащие частицы порошка, что способствует образованию вокруг капли пустот (рис. 2) и увеличению прироста затвердевающего металла. Наиболее сложно устранить процесс сфероидизации для таких металлов, как олово, медь, цинк, свинец, имеющих высокую вязкость и низкую смачиваемость. Только благодаря оптимизации технологических режимов обработки удается получить качественный результат.

Хорошие механические характеристики металлов, получаемых методом СЛП, в значительной степени связаны с их мелкозернистой структурой, достигаемой вследствие высоких скоростей охлаждения расплава. Это существенно увеличивает число зародышей твердой фазы и уменьшает их критический размер. При этом кристаллы, растущие с высокой скоростью на зародышах, соприкасаются друг с другом, что препятст-

вует их дальнейшему росту и способствует формированию мелкозернистой структуры.

В общем случае можно выделить два вида микроstructures металлов, полученных методом СЛП: столбчатую (рис. 3, *a*) и ячеистую (см. рис. 3, *б*). Первый вид микроstructures отличается от второго наличием крупных столбчатых зерен.

Столбчатая микроstructure образуется в процессе затвердевания первых слоев, где зарождается множество зерен, рост которых происходит преимущественно вдоль направления максимального температурного градиента. По этой причине микроstructure формируется также в указанном направлении. Максимальный температурный градиент, как правило, ориентирован вдоль направления выращивания, но он может быть изменен путем изменения стратегии сканирования. При нанесении последующих слоев металл предыдущих слоев переплавляется, поэтому затвердевший материал принимает ту же кристаллографическую ориентацию, что и у нижних зерен. По этому механизму, который называется эпитаксиальным ростом, зерна могут прорасти сквозь несколько слоев, образуя крупные и столбчатые зерна. Этот тип затвердевания, требующий стабильного плоского фронта кристаллизации, характерен для чистых и низколегированных материалов. В связи с этим чистые металлы (тантал, титан, вольфрам), а так-

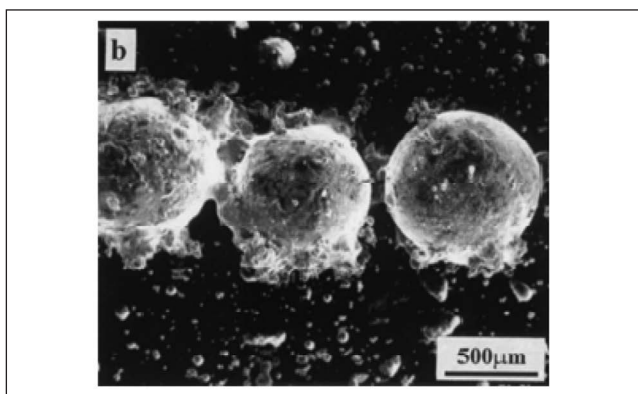


Рис. 2. Образование сфер на поверхности детали

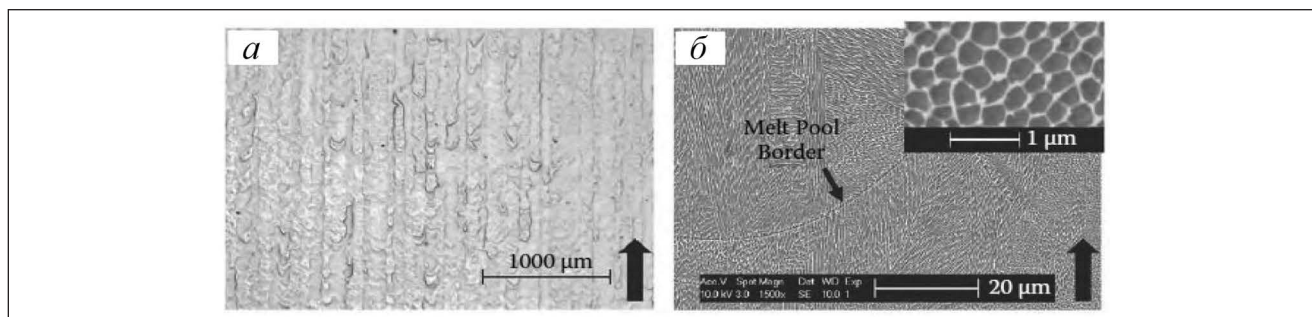


Рис. 3. Виды микроstructures, полученных методом СЛП:
a — столбчатая структура титанового сплава; *б* — ячеистая структура

же сплавы с плоским фронтом кристаллизации, такие как титановый сплав Ti6Al4V имеют морфологию со столбчатой структурой.

Ячеистая структура характерна для средне- и высоколегированных сталей и сплавов, которые имеют нестабильный фронт кристаллизации. В этих сплавах локальные возмущения фронта приводят к развитию мелкозернистой структуры, в которой зерна, состоящие из множества ячеек, растут к центру ванны расплава.

На рис. 4, *а* показана микроструктура алюминиевого сплава AlSi10Mg, полученная методом СЛП, хорошо видна ячеистая структура алюминия, окаймленная эвтектикой с фазой кремния.

Для сравнения на рис. 4, *б* представлена структура литого материала, где эвтектика, содержащая достаточно крупные частицы кремния, располагается между дендритами алюминия. Более тонкая микроструктура алюминиевого сплава AlSi10Mg, полученная методом СЛП, обеспечивает лучшие механические свойства, чем у литого материала.

Скорость затвердевания материала в процессе СЛП можно регулировать варьированием параметров обработки: сочетая высокую мощность излучения с высокой скоростью сканирования лучом или низкую

мощность лазерного излучения с низкой скоростью сканирования.

Недостаток высокой скорости охлаждения в процессе СЛП — возникновение термонаведенных остаточных напряжений. Это один из основных факторов, которые ограничивают номенклатуру материалов для СЛП. Указанные напряжения вызывают дефекты: деформацию, коробление, расслаивание, размерные неточности, микро- и макротрещины (рис. 5). Трещины могут значительно ухудшить механические характеристики, а остаточные растягивающие напряжения в поверхностном слое отрицательно влияют на усталостную прочность.

Остаточные напряжения имеют разное происхождение. Одни появляются вследствие возникновения деформационных напряжений в твердом веществе под слоем расплавленного материала. Когда лазерный луч сканирует поверхность подложки, в ней возникают сжимающие термонапряжения, которые могут достигать предела текучести, вызывая пластическую деформацию. При охлаждении подложка стремится сократиться — и сжимающие напряжения становятся растягивающими. Эти напряжения могут достигать предела прочности и, следовательно, инициировать и распространять трещины в материале.

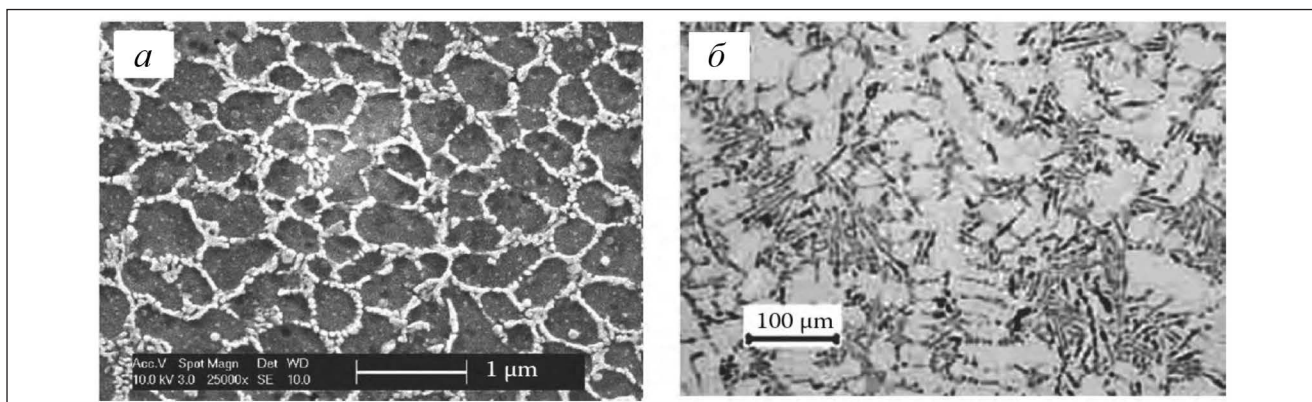


Рис. 4. Микроструктура алюминиевого сплава AlSi10Mg: *а* — полученная СЛП; *б* — полученная по литейной технологии

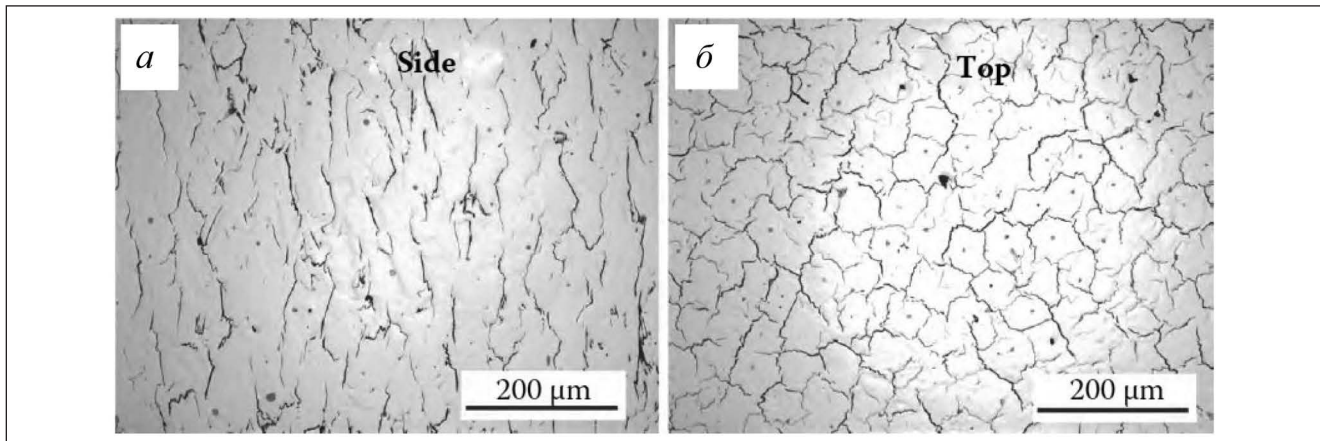


Рис. 5. Микроструктура с наличием трещин в сплаве Hastelloy C276:
a — сечение поверхности валика; *б* — поперечное сечение валика

Деформационные напряжения дополняются напряжениями, вызванными нагревом и остыванием верхних слоев. По мере остывания расплавленного слоя затвердевший материал будет сжиматься, но усадка будет ограничена соседними холодными слоями. Это также приводит к появлению растягивающих напряжений в центральной части детали.

При анализе причин возникновения остаточных напряжений в процессе СЛП следует учитывать, что каждый слой состоит из нескольких отдельных векторов сканирования. Вследствие удлиненной формы ванны расплава усадка в направлении вдоль вектора сканирования отличается от усадки в направлении, перпендикулярном этому вектору. Анизотропия в локальной зоне остаточных напряжений в среднем в 2 раза больше в продольном направлении сканирования, чем в перпендикулярном. Таким образом, короткие векторы сканирования

могут быть использованы для смягчения остаточных напряжений.

Альтернативный способ снижения остаточных напряжений — повышение температуры обработки. Это может быть реализовано путем предварительного нагрева опорной подложки (рис. 6). Видно, что увеличение температуры подогрева подложки от 90 до 200 °С за счет уменьшения градиента температур и уровня остаточных напряжений полностью устраняет образование дефектов расслоения и трещин.

Для изготовления деталей методом СЛП эффективно использовать мартенситно-старяющие стали, в которых упрочнение и повышение твердости достигается вследствие выделения дисперсных интерметаллидных фаз при термообработке. Эти стали содержат малое количество углерода (сотые доли проценты), в результате чего образовавшаяся при быстром охлаждении решетка мартенсита характеризуется малой степе-

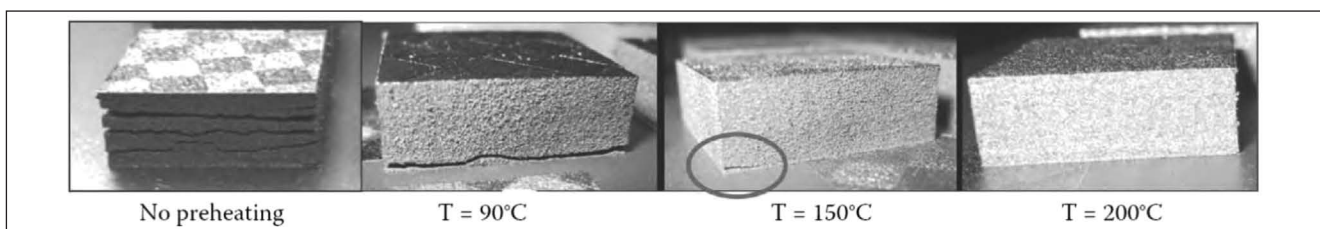


Рис. 6. Влияние температуры подогрева подложки на образование дефектов в виде трещин и отслоения при СЛП порошка из быстрорежущей стали M2

нию искаженности, и поэтому мартенситная фаза имеет низкую твердость. Низкая твердость, а также высокая пластичность мартенсита обеспечивает релаксацию внутренних напряжений при закалке, при этом высокое содержание легирующих элементов позволяет прокаливать сталь на большую глубину почти при любых скоростях охлаждения. Благодаря этому с помощью СЛП можно изготавливать и подвергать термической обработке сложные изделия, не опасаясь образования трещин или коробления. Помимо мартенситно-старееющих сталей, можно использовать некоторые аустенитные нержавеющие стали, например нержавеющую сталь 316L.

Наряду с коррозионно-стойкими сталями ответственные конструкции изготавливают из порошков цветных металлов. Медные сплавы благодаря их низкому удельному сопротивлению и высокой теплопроводности широко используют в промышленности в различных теплообменниках. Это связано с тем, что теплообменники, как правило, имеют сложную геометрию и замкнутые полости для уменьшения тепловых потерь и повышения коэффициента полезного действия [1].

При выращивании изделий из медного порошка действием лазерного излучения довольно трудно создать необходимую кон-

центрацию энергии для расплавления порошкового слоя из-за быстрого распространения тепловых потоков в объем материала изделия. В связи с этим для получения стабильной и качественной структуры следует применять лазерное излучение большей мощностью с высокой плотностью мощности [2] или использовать два лазерных излучателя.

Выполнены исследования по выращиванию деталей из порошкового молибденового материала марки ЛМ-2 методом СЛП на установке СЛП-250. Подготовлена порошковая смесь из частиц размерами 15–40 мкм.

Для исследования микроструктуры этого сплава взяты образцы, полученные сплавлением при удельной энергии 379 Дж/мм³, обладающие наименьшей пористостью — 0,58%. Микроструктуры образцов из молибденового сплава ЛМ-2, полученных методом СЛП, показаны на рис. 7.

На образцах (рис. 7) наблюдаются удлиненные столбчатые зерна, ориентированные по направлению выращивания и достигающие в длину 500–550 мкм, что во много раз меньше, чем в образцах, полученных с помощью электронно-лучевой и электродуговой плавок.

Образцы были получены последовательным переплавом слоев порошка с частица-

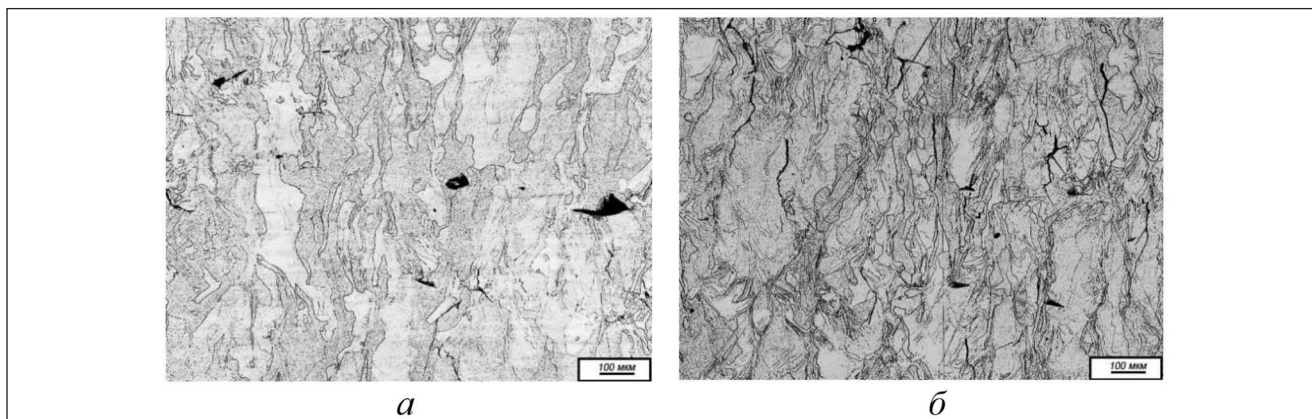


Рис. 7. Микроструктура образцов из молибденового сплава ЛМ-2, полученных методом СЛП, с пористостью 2,96 (а) и 0,58% (б)

ми размером 15—40 мкм. Столбчатые зерна прорастают сквозь несколько слоев, что увеличивает межслойную связь [3].

Перечень материалов, пригодных для СЛП, постоянно расширяется. Для повышения гибкости технологии в химический состав порошков внедряют специальные легирующие элементы.

Повысить свойства алюминиевых сплавов можно созданием композиционной структуры, имеющей алюминиевую матрицу, армированную частицами TiC, TiB₂, Al₂O₃, SiC, Mg₂AlO₄.

Исследовано выращивание образцов из порошка алюминиевого сплава АК9ч со средним диаметром частиц 35 мкм при разбросе размеров частиц 15—45 мкм и карбида титана TiC в колотом виде. В основном размер частиц TiC 1—10 мкм. Неправильная колотая форма частиц негативно влияет на сыпучесть порошковой смеси. В связи с этим перед использованием алюминиевого порошка из сплава АК9ч и колотых частиц TiC проводили более тщательное смешивание компонентов.

Образцы выращивали на отечественном технологическом комплексе для селектив-

ного лазерного плавления СЛП-250 разработки Московского центра лазерных технологий. Для определения оптимальных режимов выращивания был спланирован эксперимент с варьированием режимов выращивания образцов методом СЛП.

Установлено, что содержание TiC в образцах, выращенных из порошковой смеси АК9ч и колотых частиц TiC размером 1—10 мкм, влияет на пористость образцов (рис. 8).

Низкие значения удельной энергии приводят к неполному расплавлению порошковой смеси, что способствует формированию пор. Слишком высокие значения приводят к перегреву, и вследствие испарения пористость увеличивается.

Путем нанесения слоев из смеси порошка различных материалов или одновременно подаваемых в зону обработки разных порошков можно получать структуры с определенной матрицей и вкраплениями других частиц, например карбидов, т.е. композиционных материалов.

Таким композиционным материалом может служить легированная сталь, упрочненная карбидами титана с массовой долей от 20 до 70% (рис. 9).

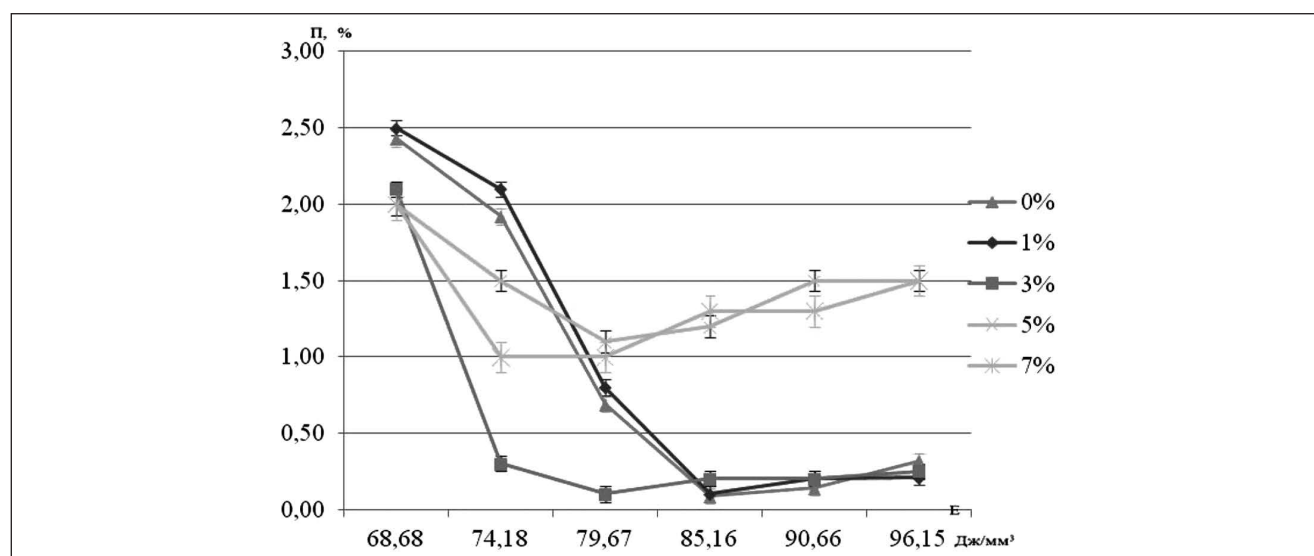


Рис. 8. Зависимость пористости П образцов от удельной энергии E лазерного излучения при различном содержании TiC, %

Благодаря высокой твердости, износостойкости и способности сохранять эти свойства при высоких температурах стали, армированные TiC, применяют для изготовления формообразующей оснастки (штампов, пуансонов, волоков), деталей измерительных инструментов, а также для валков, роликов и втулок, подвергающихся большому износу. Такие композиционные материалы перспективны для кулачков, зубчатых колес, седел клапанов, деталей подшипников, работающих в условиях сухого трения, агрессивных сред и абразивного износа.

Соотношение тугоплавкой карбидной и стальной составляющих выбирают в зависимости от назначения и требований, предъявляемых к получаемому материалу. Чем выше содержание в стали тугоплавкой фазы, тем труднее композиционный материал поддается механической обработке в отожженном состоянии, тем больше его твердость и износостойкость.

Карбид титана снижает массу композиционного материала (рис. 10), что делает его удобным материалом для изготовления деталей летательных аппаратов.

Получение композиционного материала без дефектов возможно на режимах, обеспечивающих полное или частичное растворение TiC.

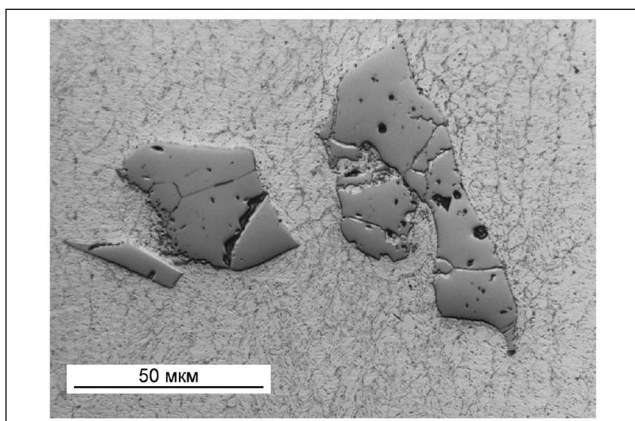


Рис. 9. Структура композиционного материала сталь—TiC

Частицы TiC также применяют также для упрочнения никелевых сплавов. Примером такого композиционного материала является композиция никелевого сплава Inconel 625, упрочненного частицами TiC. Подобный материал обладает высокими износостойкими свойствами при работе в условиях высоких температур. Наличие титана снижает плотность никелевого сплава, что уменьшает массу деталей. Это особенно важно для изделий авиационно-ракетной техники. Из такого композиционного материала изготавливают турбинные лопатки и детали двигателя с улучшенными характеристиками.

Для получения композиционных материалов с требуемыми свойствами без дефектов и хрупких соединений проводят оптимизацию лазерной погонной энергии, плотности энергии лазерного излучения, удельного энергетического вклада. Наилучшие свойства достигаются при повышенных значениях плотности энергии вплоть до 420 Дж/мм^2 . Это объясняется следующим образом. При увеличении вводимой энергии температура сварочной ванны повышается, что снижает вязкость смеси и увеличивает смачиваемость армирующих частиц. При повышен-

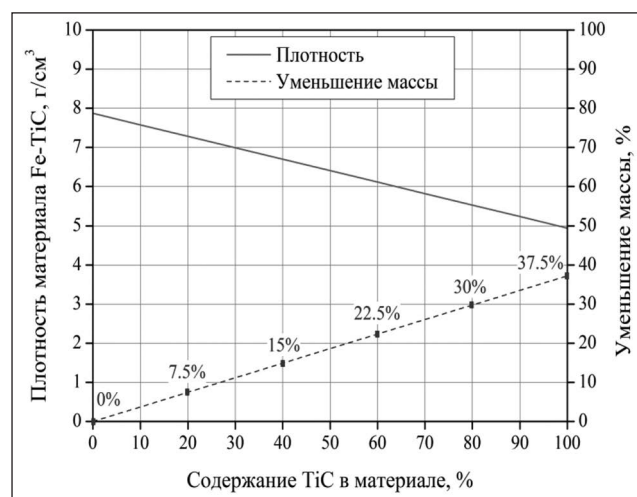


Рис. 10. Зависимость массы и плотности композиционного материала Fe—TiC от содержания TiC

ной смачиваемости частицы образуют с матрицей более плотную структуру.

Повышение комплексных свойств композиционного материала, в особенности пластичности и вязкости разрушения, может быть достигнуто при уменьшении размера вводимых упрочняющих частиц вплоть до наноразмера. Применение непосредственно наночастиц затруднено вследствие их стремления к агломерации, поэтому обычные порошковые питатели не способны обеспечить доставку этих частиц к месту обработки. В большинстве современных работ по лазерной наплавке композиционных материалов исследователи используют шаровую или планетарную мельницу для предварительного соединения наночастиц упрочнителя с микромасштабными частицами матрицы, что упрощает доставку и помогает избежать агломераций.

Использование нанопорошков способствует большему измельчению зерна получаемого композиционного материала, а также усиливает мажфазную связь частицы с матрицей, которая является наиболее слабой зоной при использовании обычных порошков микроразмера. Однако в некоторых случаях наночастицы объединяются в агломераты, что нежелательно.

При аддитивных технологиях получения композиционного материала упрочняющие частицы (карбиды, оксиды и т.д.), а также материал матрицы обычно смешивают и подают в зону обработки. Из-за различия в значениях коэффициентов расширения упрочнителя и матрицы, а также в случае загрязнения и угловатой формы упрочняющих частиц поверхность взаимодействия частицы с матрицей может являться слабой зоной.

Для устранения недостатков традиционного подхода в настоящее время развивают новый метод получения композиционных материалов. Он заключается в выделении

упрочняющей фазы в результате химической реакции между элементами в процессе затвердевания. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным. При его использовании образуется термодинамически стабильная упрочняющая фаза, сохраняется чистая поверхность упрочнителя, армирующие частицы имеют меньший размер и распределены более равномерно, а также расширяются возможности контроля процесса создания композиционного материала.

При формировании упрочняющих частиц в процессе реакции особое внимание уделяют двум аспектам: тщательному подбору состава и соотношения компонентов порошковой смеси для конкретного применения и контролю параметров нагрева, охлаждения и затвердевания.

Подобный композиционный материал получен на основе системы Ni—Ti—C методом выращивания. При плавлении смеси таких порошков упрочняющие частицы TiC образуются в процессе химической реакции в ванне расплава. В качестве исходного материала используют порошковую смесь из никеля с размером частиц в среднем 150 мкм, титана с размером частиц в среднем 75 мкм и углерода с размером частиц в среднем 150 мкм. Титан и углерод предварительно смешивают в соотношении, соответствующем стехиометрическому составу TiC. Эту смесь порошков помещают в питатель установки для лазерного послойного выращивания. С использованием этой смеси осуществляется процесс выращивания.

Микроструктура полученных композиционных материалов представляет собой никелевую матрицу с расположенными в ней частицами TiC, образовавшимися в процессе химической реакции в расплаве.

Метод формирования упрочняющих частиц в процессе химической реакции мож-

но применять для создания специальных покрытий с высоким содержанием упрочняющей фазы без дефектов и с равномерным распределением частиц.

Легирование порошковой смеси дополнительными компонентами, такими как редкоземельные элементы и наночастицы, повышает качество композиционных материалов, полученных аддитивными методами.

Редкоземельные элементы благодаря их уникальным свойствам успешно используют в металлургии, электронике, химической промышленности. Применение редкоземельных элементов для создания композиционных материалов аддитивными лазерными способами — достаточно новое направление.

Введение в композиционные материалы системы WC—Co—Cu, полученной аддитивной технологией, оксида La_2O_3 с массовой долей 1% способствует измельчению микроструктуры, повышению однородности дисперсии частиц и улучшению межфазного взаимодействия частицы с матрицей.

Таким образом, добавление редкоземельных элементов в композиционные материалы является очень эффективным средством закрепления границ зерен упрочняющих частиц и приводит к выравниванию микроструктуры, состоящей из значительно измельченных армирующих частиц.

Приведенные примеры показывают, что использование аддитивных технологий позволяет получать металлические и металлокерамические композиционные материалы различного состава, причем некоторые из них невозможно получить другими методами.

Дальнейшим развитием аддитивных технологий выращивания деталей является способ, при котором вместо порошковых

материалов используют валики из нового композиционного материала, полученного из порошковых листов. Открываются широкие возможности варьирования состава материала благодаря технологии горячего прессования листов и упрощению конструкции установок, поскольку отпадает необходимость в сыпучих порошках в камере сборки [4].

После СЛП можно применять различные методы модификации поверхности: механические (абразивные, пескоструйные и обработка резанием); химические (травление кислотами, поверхностное окисление); термические (плазменное напыление). Эти методы используют после процесса СЛП, поэтому требуется удаление детали с платформы построения, что увеличивает общее время производства, вызывает дополнительные погрешности и повышает конечную стоимость детали. Однако качество поверхности при СЛП может быть улучшено последующим контролируемым оплавлением.

Другой технологический процесс непосредственного улучшения поверхности деталей, полученных методом СЛП, заключается в испарении части материала лазерным импульсным лучом. Этот процесс называется селективной лазерной эрозией (СЛЭ).

Главной задачей метода СЛП является достижение оптимальных соотношений всех параметров, влияющих на процесс: скорости сканирования, частоты импульсов, мощности лазерного излучения, расстояния между треками, числа расплавляемых слоев.

Для реализации технологий аддитивного производства требуется сложное высокоточное оборудование с программным управлением многими параметрами. В частности, необходимо управление высокоскоростными элементами механических

частей установки, точной и дозированной подачи порошка, энергетическими параметрами источника лазерного излучения, элементами фокусировки излучения, а также контрольными приборами и устройствами. Такое многообразие взаимосвязанных элементов управления создает существенные сложности проектирования и изготовления оборудования для реализации аддитивных процессов.

Разработанные технологии аддитивного производства методом СЛП и выпускаемое оборудование позволили не только выращивать детали и сложные изделия при выполнении НИОКР, но и в промышленности. Эти технологии разрабатывали на основе глубокого изучения численными методами сложных физических процессов при воздействии лазерного излучения на порошковые материалы и обширными экспериментальными исследованиями. Открываются широкие возможности для получения изделий из новых композиционных материалов, создаваемых в процессе выращивания

и обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства изделий [5].

Данная работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Hou S., Hutt D.A., Tyrer J.P. Three dimensional printed electronic devices realized by selective laser melting of copper / high-density polyethylene powder mixtures // Journal of materials processing technology. 2018. V. 254. P. 310—324.
2. Ikeshoji T.T., Nakamura K., Yonehara M. Laser melting of pure copper // Journal of the Minerals, Metal & Materials Society. 2017. V. 70. Is. 3. P. 396—400.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Аддитивные технологии. Лазерная техника и технология / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. 339 с.
4. Lupoi R., Abbott W., Senthamarai Kannan R. Metall additive manufacturing via a novel composite material using powder and polymers formed in steels // CIRP Annals. 2022. V. 71. Is. 1. P. 181—184.

ВНИМАНИЕ! ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ!

При представлении статьи в редакцию необходимо соблюдать следующие условия для учета в системе РИНЦ:

- указывать достоверное место работы автора (точное название организации, совпадающее с названием, зарегистрированным на сайте <http://elibrary.ru>);
- библиографические ссылки давать **без ошибок** (название статьи, полное название журнала, год, том, номер издания, страницы).

При несовпадении представленных и учтенных в elibrary данных автора система на запросы НЕ отвечает, т.к. не находит этих данных на своем портале.

В этом случае редакция не принимает никаких претензий.

УДК 669

Инновационное развитие малотоннажного электросталеплавильного производства

И.М. Бершицкий¹, канд. техн. наук, В.В. Васильев²,
С.А. Кононов³, канд. техн. наук, С.В. Орлов⁴

¹ООО «ТЭК-98», 109316, Москва, Россия

²Филиал АО НПО «Тяжпромараматура» — АЗТПА, 301368, Тульская обл., г. Алексин, Россия

³АО «Металлургический завод «Электросталь», 144002, г. Электросталь, Россия

⁴АО «НПО «ЦНИИТМАШ», 115088, Москва, Россия

E-mail: electropetch@gmail.com

DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-12-20-26

Статья поступила в редакцию 03.07.2025

После доработки 10.07.2025

Принята к публикации 15.07.2025

Настоящая статья посвящена вопросам повышения эффективности работы ДСП и установок «печь-ковш», в первую очередь малой емкости, за счет применения новых технических решений в конструкции и источников питания пониженной частоты.

Ключевые слова: дуговая печь, агрегат печь-ковш (АКОС), короткая сеть; трехфазная, диаметр распада электродов, пониженная частота, источник питания.

Современное электросталеплавильное производство любой мощности, включающее дуговую сталеплавильную печь (ДСП) и агрегат «печь-ковш» (АПК), оснащенные средствами электродугового нагрева, различными средствами введения реагентов и продувки расплава инертным газом, позволяет решить значительный спектр технологических и органи-

зационно-технических задач, включая получение особо сложных марок стали ответственного назначения [1].

В последние годы значительно повысился интерес к всегда существовавшей малотоннажной металлургии, представленной на заводах спецметаллургии и в литейном производстве машиностроительных заводов [2, 3]. Во многих случаях производство ограниченных партий слитков из уникальных металлов на крупных предприятиях нецелесообразно и невозможно. Специфические параметры и характеристики дуговых печей и особенно агрегатов внепечной обработки стали малой мощности вызывают дополнительные трудности, требующие применения особых технических решений. В частности, малый диаметр внутренней поверхности сталеразливочных ковшей вместимостью

0,5—5,0 т, затрудняет размещение электродов в полости ковша. Уменьшение расстояния между электродом и стенкой футеровки отрицательно сказывается на стойкости огнеупоров. В стремлении отодвинуть электроды от стенки и уменьшить диаметр их распада прибегают к уменьшению сечения электродов, что снижает их жесткость, а в сочетании с наличием трех механизмов перемещения электродов вызывает сильные вибрации и снижение стойкости электродов.

Поэтому и зарубежными, и отечественными специалистами разработаны варианты конструкции АКП с тремя электродами, расположенными на едином общем механизме вертикального перемещения, что существенно уменьшает диаметр распада электродов и увеличивает их расстояние до стенки ковша, при этом упрощает конструкцию и повышает ее жесткость и стойкость электродов [4].

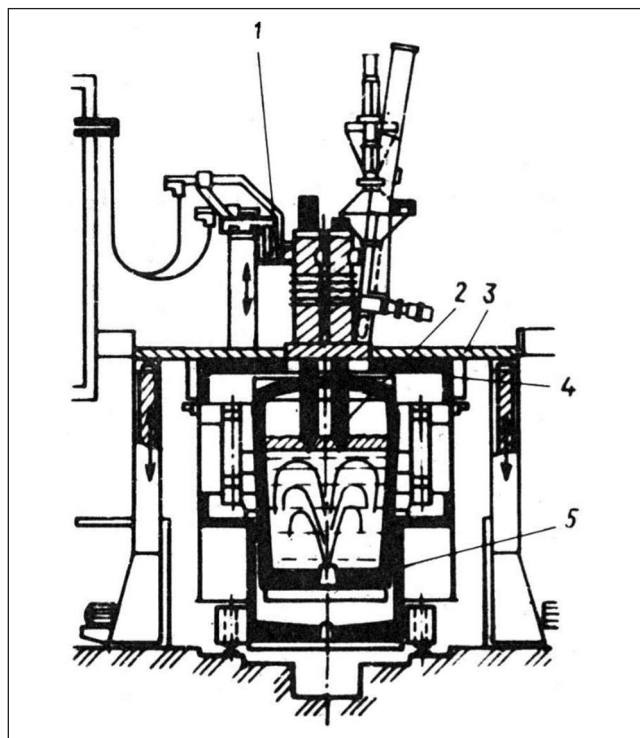


Рис. 1. АКП с объединенным держателем электродов:
1 — короткая сеть; 2 — графитированный электрод;
3 — портал; 4 — крышка; 5 — сталь-ковш

Так, например, немецкой фирмой Badische Stahl Engineering GmbH разработана и реализована новая конструкция печи-ковша с общим держателем для трех электродов (рис. 1). Такая конструкция обладает большой компактностью, что особенно важно при ограниченных габаритах цеха и особенно ковшей.

Водоохлаждаемые зажимы электродов с гидравлическим приводом смонтированы на общей каретке и электрически изолированы друг от друга. Питание к электродам подводится при помощи контактов в виде медных труб (трубошин).

По сравнению с традиционной конструкцией не требуется большого диаметра распада электродов. В обычных АКП с независимым перемещением электродов диаметр распада электродов диаметром 300 мм составляет в среднем 700 мм, традиционных конструкций фирмы BSE — 600 мм. Размещение электродов на общем держателе позволяет уменьшить диаметр распада электродов до 480 мм, что способствует уменьшению воздействия излучения на стенки ковша и повышению стойкости огнеупоров.

Более простая конструкция электронагревателя уменьшает проблемы, связанные с его обслуживанием. Регулировка положения торцов электродов может быть осуществлена механически путем опускания их на платформу сталевоза и выравнивания положения торцов. Подобная операция проводится в среднем через каждые пять плавков [5].

Аналогичную конструкцию, разработанную в «ТЭК-98», успешно эксплуатируют с 2007 г. на ряде отечественных предприятий, и она показывает хорошие производственные результаты.

В связи с тем, что сталеразливочные ковши вместимостью до 3—15 т имеют небольшой внутренний диаметр, стойкость

футеровки в соответствии с критерием Швабе (R_{ϕ}) существенно снижается.

$$R_{\phi} = \frac{P_{\text{дуг}} \cdot U_{\text{дуг}}}{a^2},$$

где $P_{\text{дуг}}$ — мощность дуги, кВт; $U_{\text{дуг}}$ — напряжение на дуге, В; a — расстояние от электрода до стенки ковша, мм.

Следовательно, для таких ковшей целесообразно использовать установки «печь-ковш» с тремя электродами, перемещаемыми одним механизмом. Но при этом надо учитывать, что на стойкость футеровки значительное влияние оказывает равномерность распределения мощности по фазам.

При этом остро встает вопрос об использовании печи-ковша с малым диаметром распада электродов. Проанализировав использование различных вариантов конструкций АКП с трехфазных электронагревателями различных фирм, приняли решение о целесообразности применения печи-ковша с тремя электродами, перемещаемыми с помощью общего механизма.

Математическое моделирование параметров трехфазной короткой сети печи-ковша при различном расположении токоподводов и их геометрии показало:

1. Если трехфазная короткая сеть печи-ковша или дуговой печи выполнена по схеме «треугольник на электродах», питание к контактным головкам электрододержателей каждой фазы подается с помощью трубошин, то за счет установки токопроводящих шунтирующих перемычек между трубошинами, положение которых можно регулировать в пределах каждой фазы и выравнивать распределение мощности дуг по фазам.

2. Для обеспечения равномерного подвода мощности к каждому электроду в системе электрододержателей трехфазных электродуговых и электрошлаковых печей, смонтированных через изоляцию на общей несущей раме, головки с контактными



Рис. 2. Агрегат комплексной обработки стали в ковше вместимостью 15 т с тремя электродами на общем кронштейне

щеками разных фаз нужно устанавливать на разных уровнях. Разработанный на основании проведенных исследований АКП вместимостью 15 т АКОС-15 с тремя электродами на одной траверсе (рис. 2) был запущен в работу в ОАО «ОЗММ» в 2007 г., где успешно эксплуатируется по настоящее время. Он показал следующие преимущества перед агрегатами с отдельным перемещением электродов:

упрощенную конструкцию (один механизм и один регулятор вместо трех) и, соответственно, повышенную надежность;

уменьшенную индуктивность короткой сети за счет сближения и триангулирования ее элементов, не изменяющихся в течение всего цикла;

равномерное распределение мощности по фазам (табл. 1) обеспечивает равномерный угар электродов по фазам (табл. 2);

1. Значение электрических сопротивлений печи по фазам при надлежащей установке перемычек [с учетом сопротивления обмотки трансформатора (1-й ступени напряжения)]

Фаза	R , мОм	X , мОм	Z , мОм	ΔZ , %
A	1,008	5,074	5,173	0,274
B	1,012	5,076	5,176	
C	1,005	5,075	5,174	

2. Параметры промышленных плавок на АКЭС-15 ОАО «ОЗММ»

Марка стали	Угар электрода, I		Угар электрода, II		Угар электрода, III		Разброс угара	Сумма угара
	мм	кг/т	мм	кг/т	мм	кг/т		
5ХНМ	30—55	0,167—0,306	30—50	0,167—0,278	32—50	0,178—0,278	2—5	0,512—0,862
40Х	35—38	0,195—0,211	35—40	0,195—0,222	35—36	0,195—0,2	0—4	0,584—0,634
30ХГСА	50	0,278	45	0,250	50	0,278	5	0,806
35ХМА	30—55	0,167—0,306	35—55	0,195—0,306	30—50	0,167—0,278	5	0,528—0,890
70Х	40	0,222	35	0,195	40	0,222	5	0,639
Ст45	30—35	0,167—0,195	30—35	0,167—0,195	30—35	0,167—0,195	5	0,528—0,556
17ГС	20—35	0,111—0,195	15—35	0,084—0,195	25—35	0,139—0,195	0—10	0,334—0,584
40ХН2МА	35—50	0,195—0,278	35—50	0,195—0,278	40—50	0,222—0,278	0—5	0,612—0,834
55НГН6	40	0,222	40	0,222	50	0,278	10	0,723
65Г	40	0,222	35	0,195	35	0,195	5	0,612

упрощение обслуживания и меньшую стоимость.

На нагрев металла в ДСП и АКП идет только активная мощность печного трансформатора, которая равна:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

где U — напряжение печного трансформатора на стороне НН, В; I — ток, А; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности на стороне НН (на вторичной стороне).

Известно, что $\cos \varphi$ большинства ДСП и АКП вместимостью 1—5 т, запитанных от источника питания с частотой тока 50 Гц, равен 0,7. При этом зависимость реактивной мощности от частоты можно определить по формуле:

$$R_{\varphi} = I^2 \cdot X = I^2 (X_L - X_C) = I^2 \cdot \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right),$$

где I — ток, А; X — сопротивление, Ом; X_L — индуктивное сопротивление, Ом; X_C — емкостное сопротивление, Ом; f — частота, Гц; L — индуктивность, Гн; C — емкость, Ф.

Из выражения следует, что с увеличением частоты реактивная мощность растет, со снижением — падает, а на активную мощность частота не влияет. Следовательно, снижая частоту источника питания, можно снизить реактивные потери, увеличить ак-

тивную мощность, вводимую в печь, поднимая тем самым ее производительность.

Для печи-ковша малой вместимостью 0,5—5,0 т используют электроды диаметром 80—150 мм. Они имеют относительно малую жесткость и, как следствие, существенную амплитуду колебаний при перемещениях и изменениях величины протекающего по ним тока. Амплитуда дополнительно увеличивается из-за колебаний электрододержателей. В связи с этим приходится использовать электроды большего диаметра, и, как следствие, увеличивать диаметр распада электродов, а следовательно, диаметр ковша.

В результате снижается высота металла в ковше, растет масса футеровки, увеличиваются время прогрева ковша и тепловые потери, возрастает скорость остывания металла, снижается КПД установки.

В процессе эксплуатации установки «печь-ковш» за счет работы системы продувки металла аргоном возникает неравномерный износ (угар) графитированных электродов. Изменяя с помощью тиристорного блока источника питания распределение мощности по фазам, можно обеспечить равномерный расход электродов и тем самым добиться равномерного износа футеровки.

Дальнейшее совершенствование системы электропитания АКП связано с использованием транзисторного источника питания пониженной частоты. Применение предлагаемой установки снижает потребляемую мощность и обеспечивает равномерный расход электродов и износа футеровки [6].

Схема АКП с тремя электродами на одной траверсе особенно подходит для цехов, где работают ДСП или индукционные печи малой вместимости с 1,5—5,0 т, так как при обработке малых порций металла возникает сложность расположения в ковше трех электродов, расположенных на трех отдельных траверсах. В результате диаметр ковша становится больше высоты металла в ковше. Как следствие, растут тепловые потери с зеркала металла, больше мощности теряется на нагрев ковша.

Так, поставленный в «Ферропром» (г. Шахты) АКП вместимостью 3 т использовал ковш диаметром 900 мм, в котором размещались три электрода диаметром 150 мм, при этом высота металла составляла 600—650 мм. Как следствие, к большим потерям тепла при обработке добавлялось быстрое остывание металла при транспортировке его к месту разлива. В результате агрегат не был запущен в работу.

При использовании АПК того же размера с электродами на общей траверсе для ввода необходимой мощности можно использовать электроды диаметром 100—120 мм. В этом случае диаметр ковша составит 450—500 мм, а высота металла увеличится.

На нормально прогретом ковше скорость остывания металла сократится и, как следствие, появляется экономичный агрегат доводки металла. При этом почти в два раза снижается расход футеровки ковша, шлака и уменьшаются потери тепла при разогреве и транспортировке металла.

Нагрузки от ДСП вызывают пульсации напряжения и появление гармониче-

ских составляющих в сети, уменьшающих эффективность энергосистемы предприятия и снижающих коэффициент мощности. Статический компенсатор реактивной мощности (СКРМ) на основе активного фильтра позволяет снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих на 2,5%.

Печь генерирует четные и нечетные гармоники и даже некрратные гармоники (интергармоники). Гармоники, генерируемые печью, могут сильно исказить напряжение в энергосистеме предприятия. Кроме того, ДСП подвержена большим колебаниям реактивной мощности. Напряжение дуги переменного тока теряет свою синусоидальную форму. Также искаженная форма кривой напряжения при проявлении дугового замыкания создает в сети потребление реактивной мощности, что отражается на энергоэффективности системы в целом.

Мощность трехфазной цепи при частоте 50 Гц с симметричными приемниками равна:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cdot \cos\varphi,$$

где $\cos\varphi$ — коэффициент мощности.

Наряду с повышением эффективности внепечной обработки значительного эффекта можно ожидать от применения такого технического решения при организации электропитания дуговых печей.

На действующих машиностроительных предприятиях присутствуют нагрузки с резкопеременным графиком работы — дуговые печи. В АО НПО «Тяжпромарматура» установлены печи вместимостью 6 т (2 шт.) и 10 т (2 шт.). Частота колебаний реактивной мощности, а следовательно, и колебаний напряжения для различных дуговых печей составляет 100—1000 колебаний/ч. Кроме того, нагрузки дуговых печей из-за неравномерности потребления тока по фазам могут вызвать значительную асимметрию напряжения.

Это обуславливает целесообразность применения принципов компенсации реактивной мощности, существенно отличающихся от принятых, в сетях с так называемой спокойной нагрузкой.

Особенности компенсации реактивной мощности в сетях с резкопеременной несимметричной нагрузкой заключаются в следующем:

резкопеременный характер нагрузки вызывает необходимость осуществлять компенсацию переменной составляющей реактивной мощности для уменьшения колебания напряжения в питающей сети;

из-за быстрых изменений потребляемой мощности (реактивной) необходимо применение быстродействующих статических компенсирующих устройств с минимальным запаздыванием по отработке колебаний реактивной мощности;

неравномерное потребление реактивной мощности по фазам требует применения пофазного управления компенсирующим устройством.

В АО НПО «Тяжпромарматура» установлено фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) 10 кВ. ФКУ состоит из вводной ячейки, современных однофазных реакторов и нескольких батарей конденсаторов. Задачей ФКУ является фильтрация гармоник совместно с компенсацией реактивной мощности на основной частоте 50 Гц. Недостатками использования является выход из строя конденсаторных батарей.

В современных условиях на машиностроительных заводах возникла необходи-

мость увеличения выплавки высококачественной стали, для чего нужно повысить производительность действующих дуговых печей и АКП. Этого можно достичь установкой либо более мощных трансформаторов на них, либо дополнительного оборудования.

Для работы в существующих установленных мощностях и действующих сетях увеличение мощности возможно за счет дополнительного снижения резкопеременной нагрузки или за счет работы дуговых печей и печи-ковша на пониженной частоте.

При этом вместимость подавляющего количества печей составляет 1–5 т, и, как правило, они оборудованы печными трансформаторами малой мощности (табл. 3), а следовательно, и заводские подстанции рассчитаны на эту нагрузку.

Все это затрудняет структурную модернизацию плавильных участков машиностроительных заводов.

В связи с тем, что работа дуговых печей сопровождается большим количеством коротких замыканий, в процессе которых значение токов в фазах может увеличиваться в несколько раз, на заводских подстанциях резервируется избыточная мощность. Если решить вопрос с бросками тока в процессе работы дуговой печи при расплавлении шихты, появляется возможность ее использовать для других целей. Кроме этого, кабельные линии от заводской подстанции до печей имеют значительное индуктивное сопротивление, значение которого можно снизить за счет компенсации реактивной мощности.

3. Параметры дуговых печей, эксплуатируемых в АО «СМК»

Показатель	ДС-0,5	ДСП-1,5	ДСП-3	ДС-5МТ	ДСП-6	ДСП-10
Номинальная емкость печи, т	0,5	1,5	3	5	6	10
Номинальная мощность, МВА	0,4	1,0–1,8	1,8–2,3	2,8–4,0	2,8–5,0	4–10
Напряжение на стороне ВН, кВ	6 или 10	6 или 10	6 или 10	6 или 10	6 или 10	6 или 10
Напряжение на стороне НН, В	213–123	225–130	245–140	257–114	257–114	160–300
Номинальный ток электрода, кА	1,1	2,6–4,3	4,3–6,3	6,3–10,4	6,3–10,4	10,4–15,0

Во многих случаях мощность электроподстанции ограничена, поэтому, чтобы найти свободную мощность, считаем целесообразным перевести питание на пониженную частоту — 0,5—5,0 Гц. Это позволяет поднять значение $\cos \varphi$ с 0,7—0,75 практически до 1. Учитывая тот факт, что источники питания пониженной частоты (ИППЧ), как правило, являются источниками тока, автоматически решается вопрос с ограничением ударных величин токов. Кроме того, соблюдаются требования ПУЭ гл. 7.5 (пп. 7.5.13; 7.5.14) относительно несинусоидальности напряжения и обеспечения энергетического коэффициента не ниже 0,98 без применения дополнительных устройств (фильтров, компенсаторов).

Полученную вследствие перевода дуговой печи на пониженную частоту или проведения компенсации реактивной мощности высвободившуюся мощность можно использовать для установки дополнительного оборудования, улучшающего качество выплавляемого металла, а именно — агрегатов внепечной обработки стали.

Заключение

Малотоннажное металлургическое производство находится в состоянии интенсивного развития. Соответственно, растет количество находящихся в эксплуатации дуговых печей и АКП малой вместимости, а также возрастает актуальность оптимизации системы электропитания. Описываемое техническое решение позволяет разрешить целый ряд технологических, конструктивных и организационно-технических проблем, связанных с эксплуатацией как дуговых электросталеплавильных печей, так

и АКП, и может быть с успехом применено как при реконструкции существующих, так и при создании новых электросталеплавильных цехов. Данное техническое решение имеет большое значение в урегулировании важнейшей проблемы современной металлургии — повышении энергоэффективности производства как необходимого условия снижения выбросов парниковых газов — и заслуживает широкого внедрения в литейных цехах машиностроительного и специального металлургического производства.

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Зинуров И.Ю., Воробьев Н.И., Кузьмин М.Г. и др. Отечественные агрегаты печь-ковш емкостью 12—300 т // Электрометаллургия. 2003. № 9. С. 2—6.
2. Протасов А.В. Современные способы внепечной обработки стали. Машины и агрегаты металлургического производства: Энциклопедия, Т. IV—V. Изд. 2-е. Испр. М.: Машиностроение, 2004. С. 106—109.
3. Плакс Н.Р. Модернизация сталеплавильных мини-заводов // ЭИЦНИИТЭ—ИТЯЖМАЖ. 1986. Сер. 1. № 27.
4. Протасов А.В., Пасечкин Н.В., Сивак Б.А. Оборудование для внепечной обработки стали. М.: Интернет Инжиниринг, 2010. 413 с.
5. Koster V., Paul G. and Weber J. Experiences with the new single-arm ladle furnace at Badische Stahlwerke AG // Metallurgical Plant and Technology International. 1991. No 4. P. 58—64.
6. Пат. 2818159 RU. Установка печь-ковш / И.М. Бершицкий, С.А. Кононов, С.В. Орлов и др. // БИ. 2024.

УДК 669.187

Модернизация чугунозаливочной машины гибкой модульной печи электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь»

П.В. Гавриш¹, Д.Р. Ганин¹, канд. техн. наук, С.М. Чеботарев²

¹Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», 462359, г. Новотроицк, Россия

²АО «Уральская Сталь», 462353, г. Новотроицк, Россия

E-mail: dmrغان@mail.ru

DOI: 10.31044/1684-5781-2025-0-12-27-34

Статья поступила в редакцию 09.08.2025

После доработки 21.08.2025

Принята к публикации 27.08.2025

Для повышения грузоподъемности, увеличения надежности, сокращения затрат на обслуживание и ремонты чугунозаливочной машины гибких модульных печей (ГМП) электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) АО «Уральская Сталь» изменены конструкции привода механизма передвижения и узлов ходовых колес, что повысило ремонтпригодность оборудования, позволило унифицировать данные узлы с узлами аналогичного назначения остальных напольных агрегатов участка.

Ключевые слова: чугунозаливочная машина, гибкая модульная печь, электросталеплавильный цех, механизм передвижения, привод, надежность, модернизация, унификация, колесо.

Современные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются гибким плавильным агрегатом. Они могут работать либо только на ломе, либо только на металлургическом сырье, либо в разном сочетании этих шихтовых матери-

алов с использованием жидкого и твердого чугуна [1].

В печном пролете ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» установлены две ГМП производства итальянской фирмы TENOVA [2] проектной вместимостью по 120 т каждая (с трансформаторами мощностью 96 МВА). Печи оснащены устройствами для ввода сыпучих материалов через свод, оборудованы для улавливания и очистки газов, другим вспомогательным оборудованием.

ГМП характеризуются эркерным выпуском, работают в двух режимах:

1) при нулевом потреблении электроэнергии с использованием 86% горячего чугуна и 14% горячебрикетированного железа (ГБЖ);

2) при потреблении электроэнергии с использованием 85% металлолома и 15% холодного либо жидкого чугуна.

Применяемая в ГМП технология оптимально подходит для АО «Уральская Сталь», имеющего собственное доменное производство. Она обеспечивает гибкость в процессе производства стали с использованием различных сырьевых и энергетических ресурсов, минимизируя экологическое воздействие, снижая эксплуатационные затраты, обеспечивая краткосрочную инвестиционную окупаемость благодаря высокой рентабельности, производительности, безопасности. В такой технологии наиболее эффективно используют физическую и химическую теплоту чугуна, выделяющуюся при протекании реакций окисления углерода, кремния, железа, марганца и фосфора.

Для подачи и заливки жидкого чугуна в ГМП используют чугунозаливочную машину, от надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохранности [3]) которой зависят производственные показатели выплавки стали в ЭСПЦ.

Создание и развитие технологических агрегатов и установок немыслимо без одновременного совершенствования существующего механического оборудования, повышения его производительности и надежности, долговечности и эффективности [4].

Эффективным методом устранения многообразия механизмов и деталей является унификация [5]. Унификация — это приведение конструктивных решений машин, их частей, узлов, деталей к минимально технически обоснованному числу типов [6]. При унификации максимально используют стандартизованные узлы и детали, ранее применявшиеся в других конструкциях, с возможно большим числом одинаковых базовых и присоединительных размеров [7]. Это позволяет обеспечить взаимозаменяемость и многократное применение проверенных конструкций. Унификация позволяет осуществлять агрегатирование ма-

шин [7]. Благодаря унификации можно сократить расход материалов и снизить затраты на производство [8].

Целью работы было повышение грузоподъемности, увеличение надежности, сокращение затрат на техническое обслуживание и ремонты чугунозаливочной машины ГМП ЭСПЦ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) проанализировать особенности конструкции и эксплуатации чугунозаливочной машины, а также другого напольного оборудования ЭСПЦ с целью выбора возможных вариантов унификации узлов;
- 2) выбрать и практически реализовать целесообразные направления модернизации чугунозаливочной машины;
- 3) рассчитать экономический эффект от модернизации чугунозаливочной машины.

Оборудование и материалы

Чугунозаливочная машина (рис. 1) производства фирмы TENOVA представляет собой тележку с четырьмя ходовыми колесами, два из которых — приводные от индивидуального привода (двухребордное и безребордное) и два — холостые (двухребордное и безребордное). Двухребордные колеса установлены с одной стороны тележки, а безребордные — с другой. На тележке установлено кантовальное устройство для ковша и верхний желоб для направления потока жидкого чугуна при его наклоне. Наклон желоба осуществляют с помощью гидравлической системы, установленной на тележке, включающей гидроцилиндр. Тележка оборудована системой взвешивания. Загрузку и выгрузку тележки выполняют с помощью электромостового литейного крана.

Технические характеристики чугунозаливочной машины приведены в табл. 1.

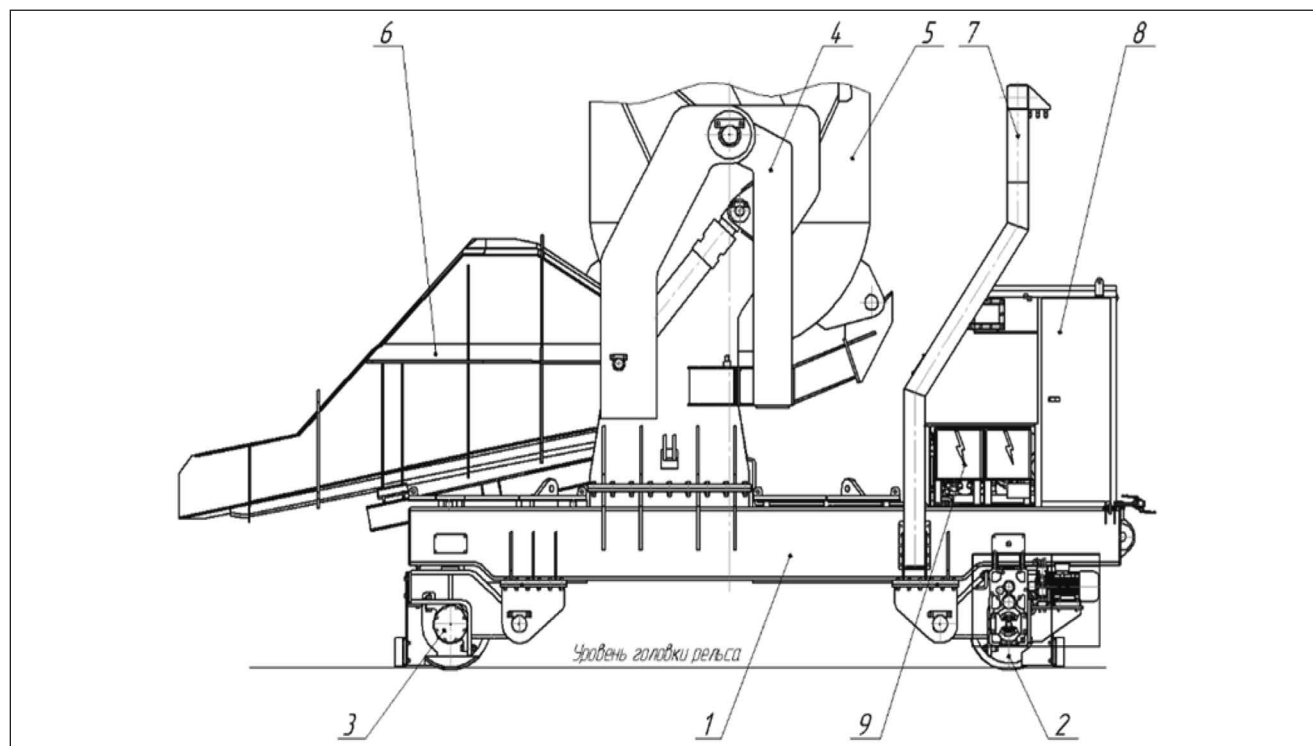


Рис. 1. Чугунозаливочная машина:

1 — тележка; 2 — колесо приводное; 3 — колесо холостое; 4 — кантовальное устройство; 5 — ковш для жидкого чугуна; 6 — верхний желоб; 7 — загрузочный рукав; 8 — отсек гидравлической системы; 9 — шкаф электрооборудования

1. Технические характеристики чугунозаливочной машины

Параметр, единица измерения	Значение параметра
Масса ковша, т	131,5
Вместимость по жидкому металлу, т	83,7
Угол поворота ковша, градус	95,0
Количество приводных колес, шт.	2
Мощность привода каждого колеса, кВт	20,0
Скорость перемещения тележки, м/мин	63,0
Ширина колеи, мм	3800
Габаритные размеры тележки, мм:	
длина	8620
ширина	5810
высота	5800

Чугунозаливочная машина работает следующим образом. Ковш с горячим чугуном устанавливается на тележку, которая перемещается до загрузочного желоба ГМП. Верхний желоб, установленный на тележке, соединяется с загрузочным желобом ГМП;

включается кантовальное устройство, наклоняя ковш. Жидкий чугун по желобу поступает в печь. После опорожнения ковша кантовальное устройство возвращает его в исходное положение. Тележка перемещается в исходную позицию. В случае необходимости процесс повторяется.

Анализ особенностей конструкции и эксплуатации чугунозаливочной машины позволил установить, что ее «узким местом» является механизм передвижения.

До модернизации привод механизма передвижения чугунозаливочной машины состоял из редуктора с передаточным числом $u = 125$, тормоза и электродвигателя итальянского производства мощностью $N = 11,0$ кВт, с частотой вращения $n = 1500$ мин⁻¹. Этот привод имел низкую ремонтопригодность:

1) литой цельный корпус редуктора усложнял процесс ремонта;

2) конструктивно не был предусмотрен запас прочности при работе с повышенными нагрузками при внештатных ситуациях;

3) в редукторе были установлены уплотнения, не соответствующие российским типоразмерам, что затрудняло их закупку для замены. Оборудование привода имело большую стоимость, а его закупка была возможна лишь у европейских производителей.

При модернизации привода механизма передвижения чугунозаливочной машины вместо импортного оборудования были

установлены электродвигатель АИР160S4 мощностью $N = 15,0$ кВт, с частотой вращения $n = 1500$ мин⁻¹; редуктор коническо-цилиндрический четырехступенчатый КЦВ специальный; тормоз колодочный ТКГ-200 отечественного производства (рис. 2). Технические характеристики редуктора КЦВ специального приведены в табл. 2. Редуктор КЦВ спроектирован в соответствии с условиями российских нормативов и ГОСТов. Косозубое зацепление в цилиндрических зубчатых передачах редуктора

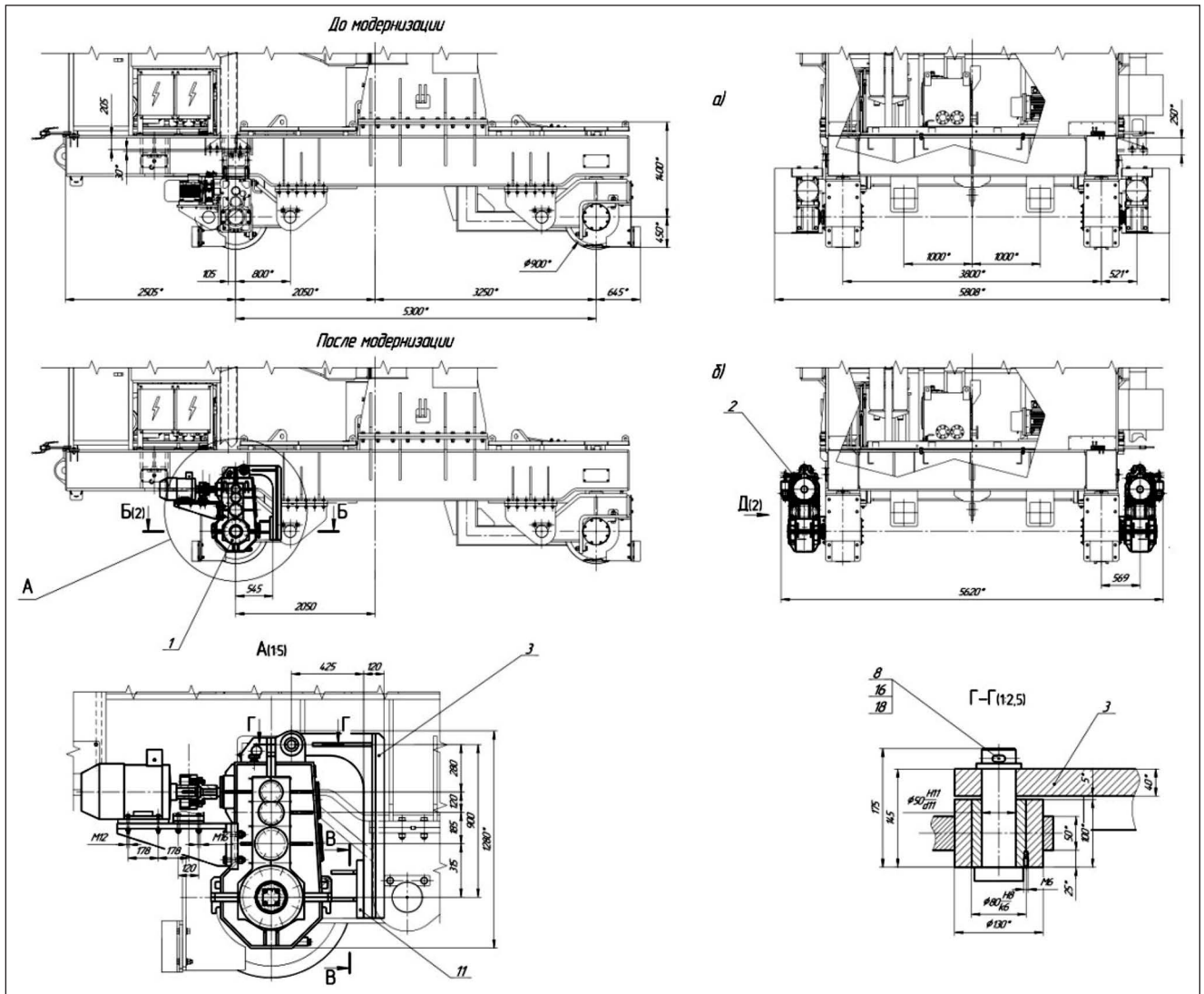


Рис. 2. Привод механизма передвижения чугунозаливочной машины до (а) и после (б) модернизации: 1 — привод перемещения правый; 2 — привод перемещения левый; 3 — рычаг; 8 — палец; 11 — лист; 16 — шайба; 18 — шплинт

2. Технические характеристики редуктора КЦВ специального

Характеристика зацепления							Максимальный момент на тихоходном валу, Н·м	
Ступень	Z_1	Z_2	α/β°	m/m_n , мм	$u_{\text{ступ}}$	$u_{\text{общ}}$		
I	17	46	20°/35°	4,5/6,411	2,705	141,8	8-B	20000
II	23	76	20°/8°06'34"	5/5,05	3,304			
III	24	75	20°/8°06'34"	6/6,06	3,125			
IV	13	66	20°/8°06'34"	10/10,1	5,077			

Примечание: Z_1, Z_2 — числа зубьев шестерни и колеса соответственно; $u_{\text{ступ}}$ — передаточные числа ступеней; α/β — угол зацепления в нормальном сечении/угол наклона зуба; m/m_n — нормальный модуль/торцовый модуль; $u_{\text{общ}}$ — общее передаточное число редуктора.

позволяет получать большие значения общего коэффициента перекрытия, являющегося суммой осевого и торцевого коэффициентов перекрытия, и поэтому предпочтительнее прямозубого зацепления. При этом зубья нагружаются постепенно, по мере их входа в поле зацепления. Косозубые передачи работают более плавно, менее шумно, с меньшими динамическими нагрузками, чем прямозубые передачи при одинаковых габаритах [9, 10].

Редуктор коническо-цилиндрический четырехступенчатый КЦВ специальный обладает:

высокой ремонтпригодностью (легкостью разбора, демонтажа и замены узлов, доступностью покупных элементов российского производства, простой схемой сборки);

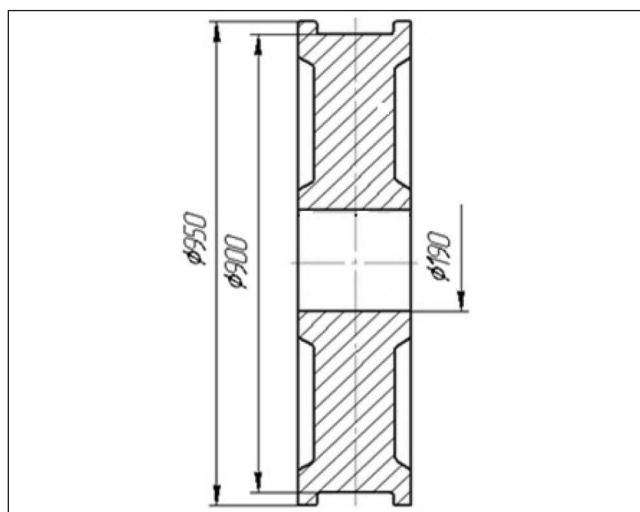


Рис. 3. Двухребордное ходовое колесо чугунозаливочной машины до модернизации

повышенным ресурсом и надежностью за счет заложенного при проектировании запаса прочности, использования проверенной схемы крановых вертикальных редукторов, применения стального сварного корпуса;

конструктивным исполнением, позволяющим изготавливать детали для обслуживания в условиях АО «Уральская Сталь»;

габаритными размерами, позволяющими выполнить модернизацию привода без значительных изменений основной рамы машины.

При модернизации чугунозаливочной машины усилению подвергли раму чугуноприемного желоба.

Улучшение прочностных характеристик рамы повысило надежность чугунозаливочной машины и позволило использовать чугуноприемные желоба с большей массой.

Конструктивные изменения при сохранении геометрии и основных соединительных размеров не потребовали изменений рамы чугунозаливочной машины.

На чугунозаливочной машине до модернизации ходовые колеса устанавливали на валах и осях с помощью посадки с натягом. На рис. 3 показано двухребордное ходовое колесо чугунозаливочной машины до модернизации.

Высокие температуры жидкого чугуна во время эксплуатации чугунозаливочной машины способствуют залипанию, затрудняя демонтаж колес с валов и осей при необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ.

В связи с этим, а также с необходимостью проведения унификации колес напольного оборудования, эксплуатируемого в ЭСПЦ, была проведена унификация ходовых колес чугунозаливочной машины, во время которой изменили их конструкцию (в ступице увеличили посадочное отверстие с 190 мм до 200 мм и выполнили отверстия для подачи смазки в соединение «колесо—вал», а также увеличили ширину нагруженной части ступицы). Это позволило повысить ресурс работы колеса, увеличить ремонтпригодность и уровень унификации оборудования, что привело к упрощению и стандартизации ремонтных операций.

На ходовых колесах изменилась конструкция вала (он увеличился), соответ-

венно, увеличилось посадочное отверстие в колесе. Подшипники при этом остались прежние. А крышки корпуса подшипников унифицировали по аналогии с крышками, используемыми на применяемых в ЭСПЦ сталевозах и шлаковозах. На рис. 4 и 5 изображены унифицированные двухребордное холостое колесо и холостое колесо без реборд.

При унификации колес также была изменена конструкция их осей и приводных валов.

Унификация узлов и деталей механизмов передвижения чугунозаливочной машины с аналогичными узлами напольного оборудования участка позволила облегчить процессы технического обслуживания и ремонтов оборудования участка.

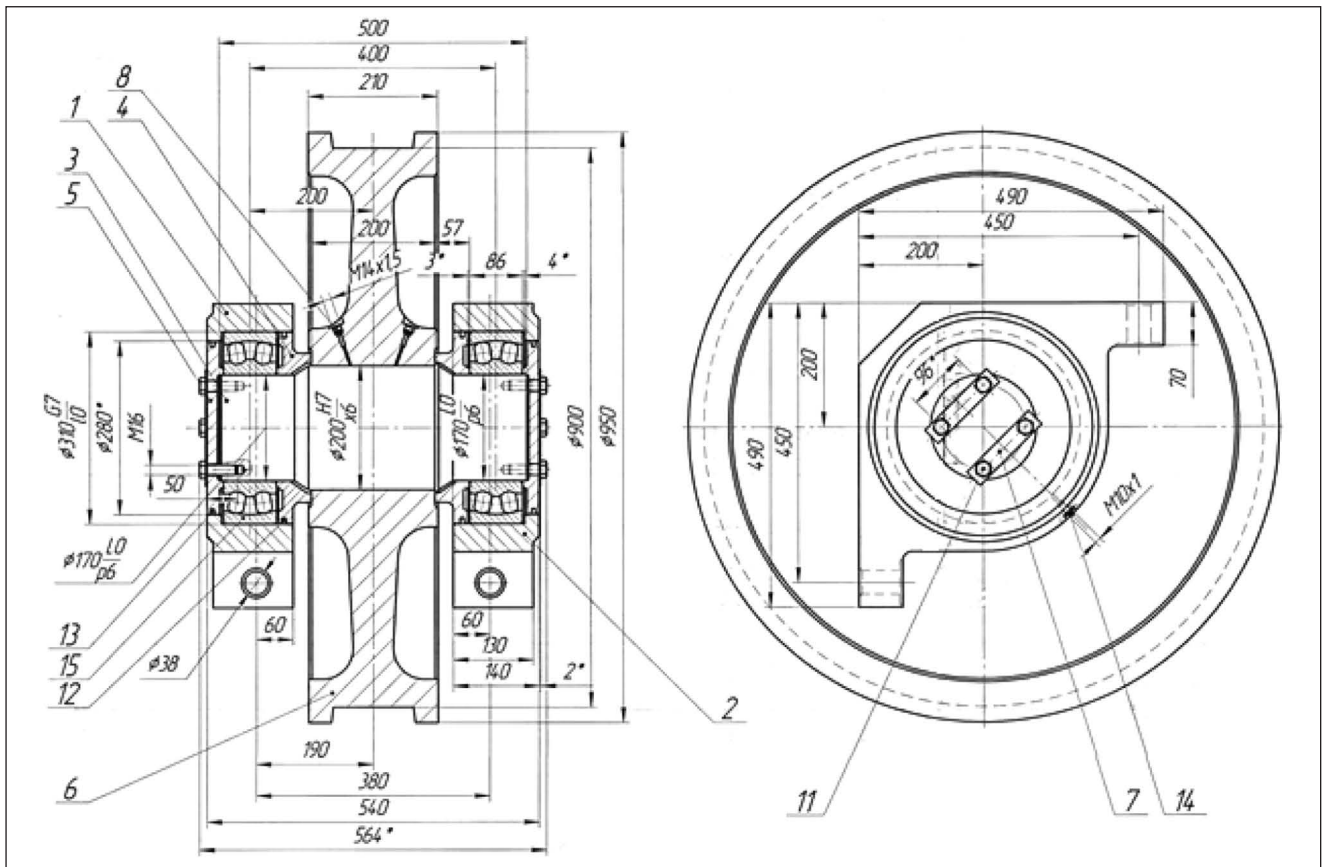


Рис. 4. Унифицированное двухребордное холостое колесо:

1, 2 — буксы; 3 — ось; 4 — кольцо; 5 — крышка; 6 — колесо диаметром 900 мм с ребордами; 7 — планка стопорная; 8 — пробка; 11 — болт; 12, 13 — кольца; 14 — масленка; 15 — подшипник 3534 ГОСТ 5721—75

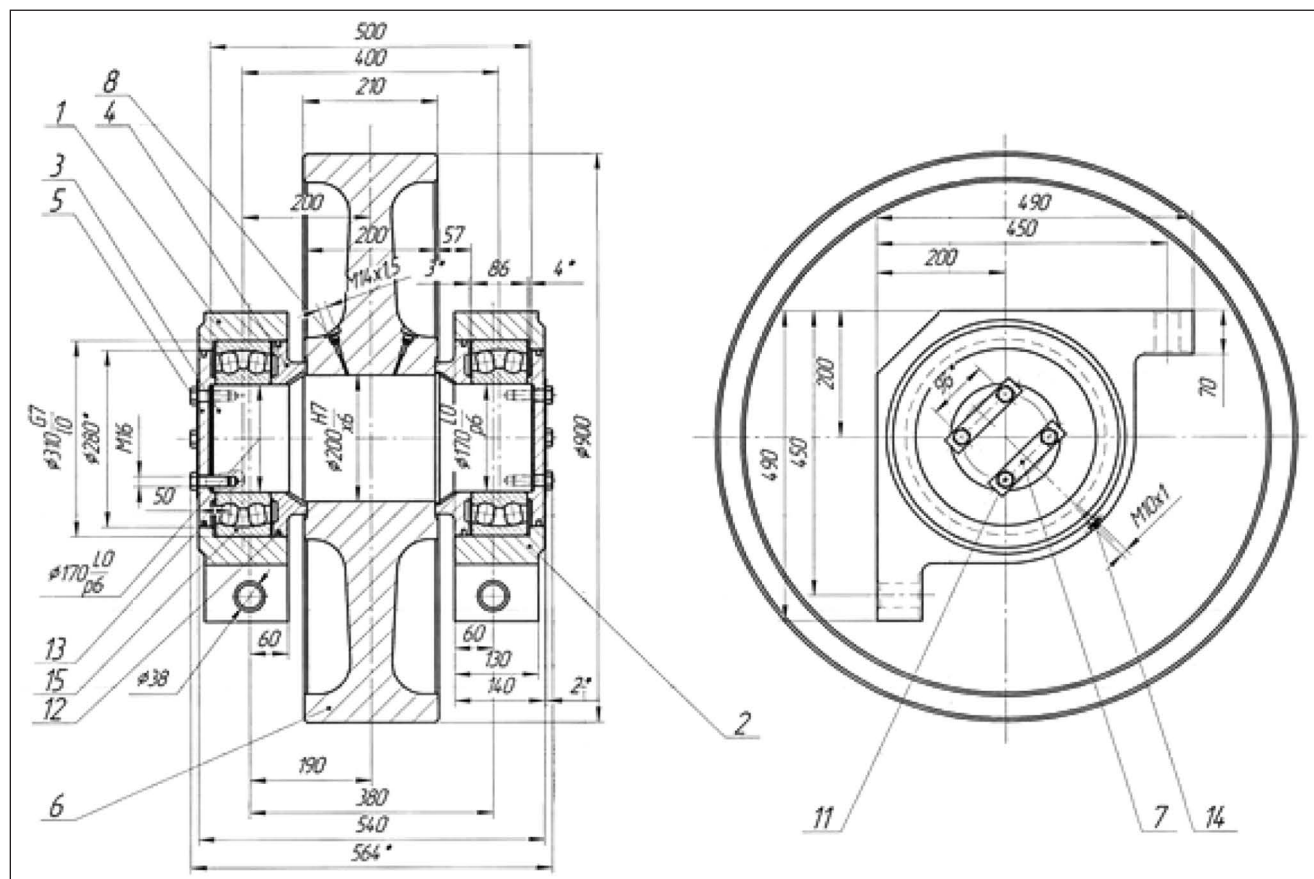


Рис. 5. Унифицированное холостое колесо без реборд:

1, 2 — буксы; 3 — ось; 4 — кольцо; 5 — крышка; 6 — колесо диаметром 900 мм безребордное; 7 — планка стопорная; 8 — пробка; 11 — болт; 12, 13 — кольца; 14 — масленка; 15 — подшипник 3534 ГОСТ 5721—75

Повышение надежности чугунозаливочной машины ГМП № 1, 2 ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» было осуществлено за счет увеличения габаритов нагруженных узлов при сохранении общего габарита.

На финальном этапе модернизации механизма передвижения машины был внедрен редуктор с более высокими силовыми характеристиками и оптимальными конструктивными решениями. Взятая за основу надежная схема трехступенчатых редукторов вертикальных крановых ВКУ с рядом усовершенствований и переработки исполнения быстроходного и тихоходного узлов позволила решить острый вопрос обеспечения потребности в мощном, надежном приводе, с ограниченными габаритами существующего оборудования.

Выводы

1. К оборудованию сталеплавильного производства, работающему в тяжелых и экстремальных условиях, всегда предъявляли жесткие требования в обеспечении надежности, прочности при минимальных затратах на техническое обслуживание, ремонты и эксплуатацию. В современных условиях насыщенного рынка, при требованиях к снижению себестоимости производства и повышению его эффективности и объемов, запрос на надежное и простое в обслуживании и эксплуатации оборудование будет только возрастать. Следовательно, отработанные конструктивные решения, показавшие себя эффективными, нужно максимально распространять и внедрять

в отечественную металлургию и машиностроение.

2. В результате модернизации чугунозаливочной машины ГМП ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» была повышена ее грузоподъемность, увеличена надежность, сокращены затраты на техническое обслуживание и ремонты. Были изменены конструкции привода механизма передвижения, что улучшило его характеристики, и узлов ходовых колес, что повысило ремонтпригодность оборудования, позволило унифицировать данные узлы с узлами аналогичного назначения остальных напольных агрегатов участка.

3. На примере чугунозаливочной машины можно максимально полно оценить и проанализировать инженерно-технический и экономический эффекты от внедрения комплекса мероприятий по унификации узлов. Так, исходные импортные редукторы стоили больше 1 млн руб. (на каждой чугунозаливочной машине установлено по два редуктора), а стоимость редукторов новой конструкции составляет 882 тыс. руб., рамы для привода — 40 тыс. руб. (их установлено по 2 шт. на каждой машине), новых валов приводных — 62 тыс. руб. Стоимость колес относительно первоначальной возросла на 20%, а стоимость осей холостых колес и деталей подшипниковых узлов при этом осталась неизменной.

4. Простои по неисправности редукторов механизма передвижения чугунозаливочной машины после модернизации практически отсутствуют. Межремонтная стойкость установленных редукторов в среднем

составляет 1 год, после истечения данного срока они проходят принудительный плановый ремонт.

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. **Рощин В.Е., Рощин А.В.** Электрометаллургия и металлургия стали. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 576 с.
2. **Кузнецов М.С., Гареев Р.Р., Михеев А.Е.** Пути повышения стойкости футеровки рабочего слоя металлургических агрегатов электросталеплавильного производства АО «Уральская Сталь» // Теория и технология металлургического производства. 2021. № 2 (37). С. 7—10.
3. **Бильдюк Н.А., Каратушин С.И., Малышев Г.Д.** и др. Детали машин. Под общ. ред. В.Н. Ражикова. СПб.: Политехника, 2015. 695 с.
4. **Сапко А.И.** Механическое и подъемно-транспортное оборудование электрометаллургических цехов. М.: Металлургия, 1986. 328 с.
5. **Орлов П.И.** Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. П.Н. Учаева. М.: Машиностроение, 1988. 560 с.
6. **Литвинов Б.В.** Основы инженерной деятельности: Курс лекций. М.: Машиностроение, 2005. 288 с.
7. **Крейтер С.В., Нестеров А.Р., Данилевский В.В.** Основы конструирования и агрегатирования. М.: Издательство стандартов, 1983. 224 с.
8. **Кохтев А.А.** Основы стандартизации. М.: Высшая школа, 1971. 296 с.
9. **Крайнев А.Ф.** Идеология конструирования. М.: Машиностроение-1, 2003. 384 с.
10. **Гулиа Н.В., Клоков В.Г., Юрков С.А.** Детали машин. СПб.: Лань, 2022. 416 с.

Указатель статей, опубликованных в журнале «Электрометаллургия» в 2025 г.

ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Ботников С.А., Лоскутов А.С., Сафронов А.А. Поведение титана в раскисленной алюминием коррозионно-стойкой стали при вторичном окислении в промежуточном ковше МНЛЗ № 11

Заблоцкая Ю.В., Тужилин А.С., Эжитейн Д.А., Садыхов Г.Б. К вопросу гидрOMETаллургического обескремнивания кварц-титановых концентратов Пижемского месторождения с различным содержанием железа № 8

Орлов А.А., Пожого О.З., Шалин А.В., Скворцова С.В., Нейман А.П. Водородная обработка — инновационный способ обработки сплавов на основе титана № 9

Седухин В.В., Ефимушкин А.С., Чуманов И.В. Опыт реализации выплавки стали марки 07X16H4Д4Б в условиях АО «Металлургический завод «Петросталь» № 11

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ

Андрянов Ю.В. Исследование влияния параметров режима дуговой наплавки с применением дополнительной присадочной проволоки на формирование износостойкого наплавленного металла системы Fe—C—Cr—Nb—V+(TiC) № 10

Балмаев Б.Г., Тужилин А.С., Ветчинкина Т.Н., Заблоцкая Ю.В. Физико-химические исследования разложения минерального алюминийсодержащего сырья кислотными способами. . № 4

Булычев В.В., Балашов С.А., Голубина С.А., Труханов К.Ю. Металлургические особенности формирования сварного соединения при

электроконтактной точечной сварке деталей из сплава Д16 с предварительным формированием разгрузочных канавок № 5

Быкова А.Е., Овчинников В.В., Скакова Т.Ю. Сварка трением с перемешиванием литейных алюминиевых сплавов № 10

Григорьянц А.Г., Елизаветский К.С. Особенности современных аддитивных технологий лазерного селективного выращивания деталей из металлических порошков № 12

Лысенко А.П., Тарасов В.П., Гореликов Е.С., Мулык Д.Н. Электролитическое рафинирование чернового сплава Pb—Sn № 2

Овчинников В.В., Проценко Е.О., Клочков Я.М. Лазерная сварка листов алюминиевого сплава системы Al—Ca—Mg № 4

Тарасов В.П., Лысенко А.П., Комелин И.М., Мулык Д.Н. Электролитическое рафинирование алюминия. № 4

Чуманов И.В., Матвеева М.А., Сергеев Д.В. Теория и практика введения специальных частиц для изменения химического состава металлической ванны при ЭШП № 12

ТЕОРИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Александров А.А., Анучкин С.Н., Каневский А.Г., Филиппов К.С. Термодинамика растворов кислорода в железоникелевых расплавах при комплексном раскислении марганцем и алюминием № 1

Роштин В.Е., Роштин А.В. Электрохимия восстановительных процессов: от топливных элементов в доменных и ферросплавных печах к прямому электролизу руды № 8

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Берицкий И.М., Васильев В.В., Кононов С.А., Орлов С.В. Инновационное развитие малотоннажного электросталеплавильного производства № 12

Гавриш П.В., Ганин Д.Р., Чеботарев С.М. Модернизация чугунозаливочной машины гибкой модульной печи электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь» № 12

Золотарев В.В., Алиферов А.И., Кочкин В.Д., Сериков В.А. Факторы, влияющие на формирование самоспекающихся электродов руднотермических печей. Часть 1 № 1

Золотарев В.В., Алиферов А.И., Кочкин В.Д., Сериков В.А. Факторы, влияющие на формирование самоспекающихся электродов руднотермических печей. Часть 2 № 3

Алиферов А.И., Горева Л.П., Бикеев Р.А. Уровень асимметрии короткой сети при эксплуатации дуговых сталеплавильных печей № 11

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Воробкало Н.Р., Байсанов А.С., Макишев А.К., Шариева С.С., Ибраимова Ж.А. Термодинамическое моделирование карботермического процесса выплавки комплексного ферросплава с титаном № 11

Исаев М.К. Моделирование процесса растворения кальцийсодержащей порошковой проволоки при внепечной обработке стали № 11

Королев С.А., Быховец М.В. Компьютерная система анализа свариваемости сталей № 6

Ячиков И.М., Шафиков Т.И. Адаптация модели распределения плотности теплового потока к медной стенке кристаллизатора слябовой МНЛЗ на основе производственных данных № 8

ПРОИЗВОДСТВО ФЕРРОСПЛАВОВ

Косдаулетов Н., Сулеймен Б., Адилев Г., Сенин А.В., Роцин В.Е. Условия получения кон-

диционного ферросиликомарганца из некондиционных железомарганцевых руд № 10

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Гвоздева О.Н., Шалин А.В., Степушин А.С., Кусакина Ю.Н., Журбенко А.С. Влияние термической и термоводородной обработок на структуру и механические свойства сплава ВТ22 № 6

Горбенко А.Д., Жидков В.К., Каплан М.А., Задорожный В.Ю., Морозова Я.А., Михлик С.А., Сергиенко К.В., Севостьянова Т.М., Колмаков А.Г., Конушкин С.В., Севостьянов М.А. Влияние серебра и отжига на свойства сплава Ti—38Zr—11Nb № 7

Пожога О.З., Шалин А.В., Скворцова С.В., Румянцев К., Зайнуллина Л.И. Формирование структуры и фазового состава в закаленном интерметаллидном титановом сплаве ВТИ-4 с разным содержанием водорода при изотермической обработке. Часть II. Обработка при 750 и 850 °С № 1

Пожога О.З., Орлов А.А., Скворцова С.В., Мамонов А.М., Смирнов П.А. Исследование деформируемости интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4, легированного водородом .. № 5

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЙ И ПОКРЫТИЙ

Абраимов Н.В., Петухов И.Г., Орехова В.В. Закономерности формирования композиционных жаростойких покрытий системы Ni—Cr—Al—Ta—W—Hf—Y на жаропрочных никелевых сплавах № 6

Астафьев Е.А., Лесневский Л.Н., Николаев И.А., Устивицкая А.А., Попарецкий А.В., Тимофеев Н.С., Тепляков В.С. Анализ характеристик фреттинг-изнашивания в режиме полного скольжения NiCrBSi-покрытий, полученных электродуговым напылением на титановом сплаве ВТ6 № 9

Волик Т.В., Парфенов В.А., Угодчикова А.В., Хохлов Н.В., Богданов С.В. Оптимизация компо-



нентного состава керамического покрытия титановых сплавов для биосовместимости отечественных эндопротезов № 7

Жачкин С.Ю., Иванчура В.И., Федоров Е.В., Трифонов Г.И. Медно-молибденовое композитное покрытие, обладающее высоким показателем микротвердости № 7

Кравченко И.Н., Величко С.А., Зайцев Д.В., Грунин И.Ю. Применение электроискровых толстослойных покрытий повышенной плотности № 6

Коберник Н.В., Панкратов А.С., Орлик Г.В., Орлик А.Г., Андриянов Ю.В., Чувицова А.А. Исследование сопротивляемости наплавленному металлу различному виду износа № 13

Коберник Н.В., Панкратов А.С., Андриянов Ю.В., Орлик А.Г., Орлик Г.В. Влияния карбида титана в составе шихты присадочной порошковой проволоки на структуру наплавленного металла № 13

Коберник Н.В., Панкратов А.С., Андриянов Ю.В., Галиновский А.Л. Плакирование порошков карбида титана никелем для применения в порошковых проволоках № 13

Коберник Н.В., Галиновский А.Л., Панкратов А.С., Андриянов Ю.В., Михайлова Ю.А. Исследование влияния состава шихты наплавочных порошковых проволок на стабильность процесса наплавки № 5

Кузнецов Ю.А., Яковлев Д.Д., Добычин А.В., Грибакин А.А., Кравченко И.Н. Исследование современных технологических методов сверхзвукового газотермического напыления порошковых материалов № 10

Опокин В.Г., Равилов Р.Г., Самойленко В.М., Шестаков В.В. Исследование влияния вязкости суспензии на структуру и свойства формируемого диффузионного покрытия № 1

Опокин В.Г., Равилов Р.Г., Самойленко В.М., Пащенко Г.Т. Экспериментальное исследование влияния технологии нанесения на структуру и свойства теплозащитного покрытия на лопатках ГТД № 7

КАЧЕСТВО, СЕРТИФИКАЦИЯ, КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Блинов В.М., Банных О.А., Банных И.О., Блинов Е.В., Лукин Е.И., Черненко Д.В., Самойлова М.А., Лукина И.Н. Циклическая прочность стареющих немагнитных ванадийсодержащих сталей № 3

Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В. Влияние химического состава и параметров глобулярной структуры на механические свойства прутков из титанового сплава ВТ6 № 2

Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Мамонов И.М. Прогнозирование механических свойств поковок из псевдо- α -титанового сплава при комнатной и повышенных температурах № 4

Зазян А.С., Терлецкий С.В. Эволюция морфологии неметаллических включений в ходе внепечной обработки высокоуглеродистой качественной стали. Часть I. Условия образования неметаллических включений на основе алюмомagneзиальной шпинели и их влияние на технологичность производства и качество готовой продукции № 5

Иванов И.А., Клауч Д.Н., Лыткин Д.Н., Щипаков Н.А., Цебеков А.Г., Пелипец В.О. Изготовление образцов с внутренними искусственными дефектами для оценки чувствительности методов неразрушающего контроля металлических изделий аддитивного производства . . . № 3

Лукин Е.И., Блинов В.М., Банных И.О., Ашмарин А.А., Севальнев Г.С., Демин К.Ю., Блинов Е.В., Анцыферова М.В., Лукина И.Н., Самойлова М.А., Черненко Д.В. Влияние холодной прокатки на структуру и механические свойства коррозионностойкой азотсодержащей мартенситно-аустенитно-ферритной стали 03X17AH2Ф № 2

Лукина Е.А., Сарычев С.М., Шалин А.В. Влияние параметров лазерной маркировки на структуру и коррозионную стойкость имплантатов из сплава на основе никелида титана № 8

Могильнер Л.Ю., Козлов Д.М. Новые направления ультразвукового контроля стыков, вы-

полненных контактной сваркой оплавлением. № 13

Чуликова Ж.Е., Овчинников В.В. Исследование влияния деформационной наследственности на физико-механические свойства стали 08X18H10T. № 9

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОДУКЦИИ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Агуреев Л.Е., Савушкина С.В., Иванов А.В., Гарибашвили С.А. Исследование микроструктуры и состава многослойного композиционного материала NiAl-сплав/Ni/Re—Mo № 2

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Агеев Е.В., Латыпова Г.Р., Агеева А.Е. Гранулометрический состав титановых порошков, полученных для аддитивных машин электродиспергированием отходов сплава ОТ4 в воде. № 3

Агеева Е.В., Агеева А.Е., Черепахин А.А. Результаты рентгеновских исследований безвольфрамовых твердых сплавов, полученных из электроэрозийных твердосплавных порошков. № 4

Агеева Е.В., Агеева А.Е., Бахмудкадиев Н.Д., Латыпова Г.Р. Структура и свойства титанового порошка, полученного электродиспергированием отходов сплава ВТ20 в дистиллированной воде. № 7

Григорьев Е.В., Капелюшин Ю.Е., Сенин А.В., Рязанов А.Г., Бильгенов А.С., Зырянов С.В. Исследование карботермического восстановления элементов из брикетированной пыли электродугового сталеплавильного производства для поиска вариантов переработки железосодержащего клинкера. № 6

Нафиков М.З., Ахмаров Р.Г., Ахметьянов И.Р., Загиров И.И., Масыгутов Р.Ф., Юнусбаев Н.М. Пластическая деформация конструктивного элемента трапецидального или треугольного профиля при электроконтактной приварке присадочной ленты. № 9

ООО «Наука и технологии»
Журнал реферируется и индексируется в Russian Scientific News (RUSSCI). Учредитель журнала ООО «Наука и технологии».
Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 017022 от 09.01.1998.
Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в ООО «СиД».
Сдано в набор 08.09.2025. Подписано в печать 28.10.2025. Формат 60×88 1/8. Печать цифровая. Усл.-печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. ?,??. Тираж 150 экз. «Свободная цена».
Отпечатано в ООО «СиД».

ПАМЯТКА АВТОРУ

ООО «Наука и технологии» принимает к рассмотрению оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, отвечающие профилю и тематике журнала для публикации.

1. Статью в электронном виде следует направить на электронную почту издательства **admin@nait.ru** с указанием названия журнала в двух форматах: DOC и PDF. После конвертирования файла в формат PDF убедитесь, что формулы и рисунки отображаются правильно.

2. Один экземпляр статьи, напечатанный на лазерном принтере на одной стороне стандартного листа формата А4, необходимо направить на адрес редакции: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60. Статья должна быть подписана всеми авторами.

Статью необходимо сопроводить следующими оригиналами документов: лицензионным договором, подписанным всеми авторами (лицензионный договор должен быть распечатан на одном листе с оборотом), и актом к нему (см. сайт <http://www.nait.ru/autors/index.php>); актом экспертизы (для граждан РФ); справкой с результатами проверки на отсутствие плагиата; сведениями об авторах.

3. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста (до 25 с. для обзоров) и 6—8 рис.

Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Части статьи располагают в следующей последовательности:

- а) индекс УДК;
- б) название статьи;
- в) инициалы и фамилии всех авторов, ученые степени и звания всех авторов. Звездочкой (*) следует отметить автора, уполномоченного работать с редакцией, и привести его контактные данные: e-mail, телефон;
- г) место работы каждого автора (полное название организации, город, индекс, страна). Для учета в системе РИНЦ указывать достоверное место работы автора (точное название организации, совпадающее с названием, зарегистрированным на сайте <http://elibrary.ru>);
- д) краткая аннотация (не более 5—7 строк) с перечислением ключевых слов;
- е) вводная часть с обоснованием актуальности и изложением цели работы (не более 1 страницы);
- ж) основной текст, который при необходимости следует разделять на разделы и подразделы (методика эксперимента, экспериментальные результаты, их обсуждение);
- з) выводы, в которых по мере возможности должно быть указано практическое применение результатов;
- и) список литературы;
- к) список подрисуночных подписей, таблицы, рисунки (в такой последовательности). Все включают в общую нумерацию страниц статьи.

Материалы пунктов б—д необходимо представить и на **английском языке**.

4. Набирать текст необходимо в **MS Word**, используя стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**, размер 14, через **полтора** интервала. Поля со всех сторон 25 мм. В числах с десятичными дробями целое число отделяют от дроби запятой, а не точкой.

5. Для набора формул следует использовать редакторы формул **Math Equation** или **Math Type**. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Знак корня (радикал) следует писать так, чтобы его горизонтальная черта полностью накрывала все подкоренное выражение. Русские и греческие буквы в формульном тексте набирают прямым шрифтом, латинские — курсивным, за исключением математических обозначений, а также обозначений химических элементов, которые набирают прямым шрифтом.

6. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна быть в системе СИ.

7. Элементы **списка литературы** должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы. Для книг указывается место издания, издательство, год издания и количество страниц. Для статей — полное название журнала или сборника, год, том, номер выпуска, страницы.

8. Графический материал нужно предоставить в форматах **jpeg** или **tiff** с разрешением не менее **300 dpi** только в черно-белом изображении. Рисунки должны быть четкими и не требовать перерисовки.

Каждый рисунок нужно распечатать на отдельной странице, указать его порядковый номер, авторов и название статьи.

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается.

ЛИЦЕНЗИОННЫЙ ДОГОВОР

о передаче исключительного права на использование произведения

г. Москва

«___» _____ 20__ г.

Автор(ы) _____, именуемый(е) в дальнейшем «Лицензиар», с одной стороны и ООО «Наука и технологии», в лице генерального директора Карцева Дмитрия Владимировича, действующего на основании Устава, именуемое в дальнейшем «Лицензиат», с другой стороны, а вместе именуемые «Стороны», заключили настоящий договор о нижеследующем:

1. Предмет договора

1.1. Лицензиар предоставляет Лицензиату безвозмездно право использования оригинального произведения в установленных настоящим договором пределах. Произведение должно быть проверено лицензиаром на плагиат.

1.2. Объектом авторских прав, право использования которого предоставляется по настоящему договору, является произведение _____.

1.3. Лицензиар предоставляет Лицензиату право использовать произведение следующим образом:

1.3.1. воспроизведение произведения или отдельной его части на русском языке в любой материальной форме, в том числе на бумажном и электронном носителях в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата;

1.3.2. распространение произведения или отдельной его части на любом носителе на русском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата, путем продажи или иного отчуждения его оригинала или экземпляров;

1.3.3. доведение произведения или отдельной его части до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к произведению из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в том числе через всемирную компьютерную сеть Интернет);

1.3.4. право на перевод произведения на английский язык;

1.3.5. воспроизведение произведения или отдельной его части на английском языке в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата;

1.3.6. распространение произведения или отдельной его части на любом носителе на английском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или баз данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата, путем продажи или иного отчуждения его оригинала или экземпляров;

1.3.7. доведение произведения или отдельной его части на английском языке до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к произведению из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в том числе через всемирную компьютерную сеть Интернет);

1.3.8. сублицензирование (выдача разрешения) полученных прав по настоящему договору в целом или частичном виде для перевода, издания, распространения и доведения до всеобщего сведения на английском языке.

2. Права и обязанности Сторон

2.1. Лицензиат может использовать произведение только в пределах тех прав и теми способами, которые предусмотрены настоящим лицензионным договором;

2.2. В течение срока действия лицензионного договора Лицензиар обязан воздерживаться от каких-либо действий, способных затруднить осуществление Лицензиатом предоставленного ему права использования произведения в установленных настоящим договором пределах.

3. Срок действия договора

3.1. Срок действия настоящего договора составляет 5 (пять) лет.

3.2. В случае прекращения исключительного права лицензионный договор прекращается.

4. Ответственность по договору

4.1. За использование произведения способом, не предусмотренным настоящим договором, либо по прекращении действия договора, либо иным образом за пределами прав, предоставленных договором, Лицензиат несет ответственность за нарушение исключительного права на произведение, предусмотренную Гражданским Кодексом РФ и другими нормативно-правовыми актами.

4.2. Лицензиар гарантирует наличие у него предоставляемых по настоящему договору исключительных прав на произведение.

5. Заключительные положения

5.1. Настоящий договор вступает в силу с момента его подписания.

5.2. Приложения, дополнения к договору действительны и составляют неотъемлемую часть настоящего Договора лишь в том случае если они совершены в письменной форме и подписаны обеими сторонами.

5.3. Стороны вправе использовать для передачи документов, относящихся к настоящему договору, факсимильную, почтовую и электронную почтовую связь, указанную в реквизитах сторон. Переданные с использованием факсимильной или электронной почтовой связи документы, относящиеся к настоящему договору, заверенные печатями и подписями уполномоченных лиц, имеют юридическую силу до момента получения оригиналов указанных документов.

5.4. Настоящий договор составлен в двух аутентичных экземплярах, по одному для каждой стороны.

5.5. Во всем, что не предусмотрено настоящим договором, Стороны руководствуются действующим законодательством РФ.

5.6. Автор (ы), подписывая настоящий Договор соглашается на предоставление Лицензиату согласия и на обработку его персональных данных.

Исполнитель гарантирует защиту персональных данных Заказчика, предоставленных для исполнения настоящего договора (в том числе копий паспортных данных, адресов и т. п., включая диплома Заказчика). Исполнитель не вправе передавать персональные данные Заказчика третьим лицам без согласия Заказчика, за исключением случаев, прямо предусмотренных действующим законодательством РФ.

Лицензиат вправе хранить персональные данные Заказчика удобным ему способом, а также осуществлять их обработку для целей исполнения условий настоящего договора.

6. Реквизиты и подписи Сторон

Лицензиар

Ф. _____

И. _____

О. _____

Пасп., серия _____ № _____

выдан _____

Адрес _____

_____/_____/_____

Лицензиат

ООО «Наука и технологии»

ИНН 7728161750, КПП 771901001

Юр. Адрес/Адрес доставки: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60

Тел./факс: (495)988-98-65; E-mail: admin@nait.ru, dv@nait.ru

р/сч 40702810806010000025 в Филиале Центрального банка

ВТБ (ПАО) г. Москва БИК 044525411

к/сч 30101810145250000411, ОГРН 102773952346

Генеральный директор _____ / Карцев Д. В. /

Уважаемые читатели!

Открыта подписка на ежемесячный научно-технический
и производственный журнал

«Электрометаллургия»

на 1-е полугодие 2026 г.

Журнал распространяется только по подписке

Подписная цена журнала — **57 600 руб.**

Стоимость одного номера журнала — **9600 руб.**, НДС не облагается.

*Вы можете оформить подписку с любого номера журнала
до 25-го числа предподписного месяца:*

- ☞ на сайте издательства **www.nait.ru** открыта электронная подписка на полнотекстовую версию журнала;
- ☞ **по безналичному расчету:** ООО «Наука и технологии» (ИНН 7728161750, КПП 771901001), р/с № 40702810806010000025, филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве, БИК 044525411, к/с № 30101810145250000411.

В графе «Назначение платежа» укажите: подписка на журнал (название журнала) на (срок). Укажите адрес, ИНН, название организации (или ФИО получателя), телефон.

Только при подписке по безналичному расчету подписная цена журнала включает в себя стоимость пересылки.

- ☞ **по каталогу периодических изданий «Урал-Пресс»** на сайте **www.ural-press.ru**;
- ☞ **по Объединенному каталогу**, подписной индекс **29079**, а также на сайтах **www.pressa-rf.ru** или **www.akc.ru**. В отделе продаж на сайте по e-mail: **podpiska@pressa-rf.ru** или по тел.: **+7 (495) 631-62-54**.

Редакция журнала предоставляет вам возможность опубликовать свои материалы о новых научных и технических разработках и достижениях, а также об опыте организации производства.

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается.

По всем вопросам формирования редакционного портфеля обращаться по адресу:

105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

Тел./факс: +7 (495) 988-98-67.

E-mail: elmet@nait.ru

<http://www.nait.ru>

По вопросам подписки, распространения и размещения рекламных материалов

обращаться по адресу: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

Тел.: +7 (495) 223-09-10, +7 (499) 995-45-23.

E-mail: market@nait.ru

