

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

Адрес редакции журнала
«Современная электрометаллургия»

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

Редактор
Д. М. Дяченко
Электронная верстка
Л. Н. Герасименко, Т. Ю. Снегирева

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

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

Рекомендовано к печати
Ученым советом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Развитие научных исследований в Отделении физико-
технических проблем материаловедения НАН Украины 3

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

*Протоковиллов И. В., Назарчук А. Т., Петров Д. А.,
Порохонько В. Б.* Особенности структурообразования
прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным
формированием слитка 11

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

*Гречанюк Н. И., Смашнюк Ю. А., Хоменко Е. В.,
Клочихин В. В., Гречанюк И. Н.* Электронно-лучевая выплавка
трубчатых заготовок из сплавов NiCrAlY, используемых
в качестве катодов для ионно-плазменного нанесения
покрытий 17

ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ

*Овчинников А. В., Теслевич С. М., Тизенберг Д. Л.,
Ефанов В. С.* Технология выплавки слитков кобальтового
сплава способом дугового переплава 23

ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА

Патон Б. Е., Григоренко Г. М., Шейко И. В. Индукционная
плавка в секционном кристаллизаторе 28

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Гасик М. И., Пройдак Ю. С. Применение электрошлакового
и вакуумно-дугового переплава для повышения качества
металла цельнокатаных железнодорожных колес 35

*Тимошенко С. Н., Стовпченко А. П., Костецкий Ю. В.,
Губинский М. В.* Пути повышения энергоэффективности дуговых
сталеплавильных печей 46

ИНФОРМАЦИЯ

Международная конференция «Сварка и родственные
технологии — настоящее и будущее» 57

Наши поздравления 59

Диссертации на соискание ученой степени 60

Календарь выставок и конференций в 2019 г. 62

ЗМІСТ

CONTENTS

Розвиток наукових досліджень у Відділенні
фізико-технічних проблем матеріалознавства
НАН України 3

Development of scientific research in the Department of
Physical and Technical Problems of Materials Science of the
NAS of Ukraine 3

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

*Протоковілов І. В., Назарчук О. Т., Петров Д. А.,
Порохонько В. Б.* Особливості структуроутворення
прецизійного сплаву 29НН при ЕШП з порційним
формуванням зливка 11

Protokovilov I.V., Nazarchuk A.T., Petrov D.A., Porohonko V.B.
Features of structure formation in the precision alloy 29NK
in ESR with a portion ingot formation 11

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

ELECTRON BEAM PROCESSES

*Гречанюк М. І., Смаїнюк Ю. А., Хоменко О. В.,
Клочихин В. В., Гречанюк І. М.* Електронно-променева
виплавка трубчатих заготовок зі сплавів NiCrAlY для
використання в якості катодів для іонно-плазмового
нанесення покриттів 17

*Grechanyuk N.I., Smashnyuk Yu.A., Khomenko E.V.,
Klochikhin V.V., Grechanyuk I.N.* Electron beam melting of
tubular billets from NiCrAlY alloys used as cathodes for
ion-plasma coatings 17

ВАКУУМНО-ДУГОВИЙ ПЕРЕПЛАВ

VACUUM-ARC REMELTING

*Овчинников О. В., Теслевич С. М., Тизенберг Д. Л.,
Єфанов В. С.* Технологія виплавки зливоків кобальтового
сплаву способом дугового переплаву 23

*Ovchinnikov A.V., Teslevich S.M., Tizenberg D.L.,
Efanov V.S.* Technology of melting ingots of cobalt alloy
by the arc remelting method 23

ВАКУУМНО-ІНДУКЦІЙНА ПЛАВКА

VACUUM- INDUCTION MELTING

Патон Б. Є., Григоренко Г. М., Шейко І. В. Індукційна
плавка в секційному кристалізаторі 28

Paton B.E., Grigorenko G.M., Sheyko I.V. Induction melting
in sectional mold 28

ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY-RESOURCES SAVING

Гасік М. І., Пройдак Ю. С. Застосування електрошлакового
і вакуумно-дугового переплавів для підвищення якості
металу суцільнокатаних залізничних коліс 35

Gasik M.I., Projdak Yu.S. Application of electric slag and
vacuum-arc remelts to improve the quality of the metal of
the all-rolled railway wheels 35

*Тимошенко С. М., Стовпченко Г. П., Костецький Ю. В.,
Губинський М. В.* Шляхи підвищення енергоефективності
дугових сталеплавильних печей 46

*Timoshenko S.N., Stovpchenko A.P., Kostetsky Yu.V.,
Gubinsky M.V.* Ways of increasing the energy efficiency of
electric arc furnaces 46

ІНФОРМАЦІЯ

INFORMATION

Міжнародна конференція «Зварювання та споріднені
технології — сьогодення і майбутнє» 57

International Conference «Welding and Related
Technologies — Present and Future» 57

Наші вітання 59

Our congratulations 59

Дисертації на здобуття наукового ступеня 60

Theses for the scientific degree 60

Календар виставок і конференцій в 2019 р. 62

Calendar of exhibitions and conferences in 2019 62

Адреса редакцій журналу

Editorial Address

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

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

Розвиток наукових досліджень у Відділенні фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України

Утворенню Української академії наук передувала активна діяльність ініціативної групи вчених, метою якої було інтегрувати наукові дослідження та об'єднати учених України. Її заснування тісно пов'язане з іменами Володимира Івановича Вернадського та Миколи Прокоповича Василенка. Проаналізувавши принципи діяльності багатьох світових академій, В. І. Вернадський дійшов висновку, що для ефективного економічного розвитку та національного самоствердження держави Українська академія наук повинна існувати не тільки як товариство видатних учених,



а бути об'єднанням державних установ, «включаючи інститути для дослідницьких і гуманітарних наук». Він далекоглядно передбачав зростання ролі науки як виробничої сили у розвитку базисних основ країни та її економічної потужності. Відмова від принципів організації академій як наукових товариств, на його думку, обумовлена бурхливим розвитком природознавства та техніки у другій половині XIX — на початку XX ст. В. І. Вернадський на основі своєї концепції запропонував новий статут Академії, підкреслюючи, що жодний з існуючих на той час у світовій практиці статутів не може бути покладений в основу її діяльності.

М. П. Василенко як міністр та вчений зробив усе можливе для реалізації запропонованої В. І. Вернадським моделі Української академії наук. Діяльність урядових комісій завершилась прийняттям 14 листопада 1918 р. «Закону Української держави про заснування Української академії наук у м. Києві», підписаного гетьманом Павлом Скоропадським. 27 листопада відбулося її перше установче Спільне зібрання. Головою-президентом Академії було обрано академіка В. І. Вернадського.

За Статутом Українську академію наук було оголошено найвищою науковою державною установою в Україні. За час свого існування вона неодноразово змінювала назву, але незмінними залишалися базові принципи її діяльності, закладені В. І. Вернадським.

Символічно, що 27 листопада 2018 р. свій віковий ювілей відзначив і її нинішній президент Борис Євгенович Патон, з ім'ям якого пов'язані основні етапи науково-технічного розвитку в Україні, починаючи з середини XX століття. Борис Євгенович став кращим виконавцем мрії В. І. Вернадського про реальний вплив створюваних національних наукових закладів академії на інтенсифікацію розвитку промисловості, сільського господарства, медицини тощо на українській землі.

На час створення Українська академія наук складалася лише з трьох наукових відділів — історико-філологічного, фізико-математичного та соціальних наук. До фізико-математичного відділу, зокрема, була зарахована Лабораторія для спроб над матеріалами на чолі з професором КПІ Степаном Прокоповичем Тимошенко, фахівцем з механіки матеріалів і теорії споруд.

1929 р. став поворотним у житті Академії. Після обрання до ВУАН вчених — представників технічних наук, зокрема, Євгена Оскаровича Патона, було зроблено рішучий крок на шляху залучення академічної науки до вирішення завдань індустріалізації народного господарства.

У 1934 р. Євгеном Оскаровичем створено Інститут електрозварювання, становлення і подальша діяльність якого пов'язані з ім'ям видатного вченого.

*За матеріалами доповіді академіка-секретаря Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України академіка Л. М. Лобанова на Загальних зборах Відділення, присвяченого 100-річчю НАН України.



У 1936 р. створено Відділ технічних наук, в інститутах якого в різні роки працювали всесвітньовідомі вчені — академіки Є. О. Патон, З. І. Некрасов, О. М. Динник, Г. Ф. Проскура, М. В. Корноухов, М. Ф. Луговцов, І. М. Францевич, М. М. Доброхотов, К. Ф. Стародубов, Г. В. Карпенко, О. П. Чекмарьов, Г. В. Курдюмов та інші.

У 1939 р. засновано Інститут чорної металургії у Харкові з відділеннями в Дніпропетровську й Києві. У той час наукову діяльність Інституту очолювали провідні вчені: директор — академік М. В. Луговцов, академіки М. М. Доброхотов, В. Н. Свечников, Г. В. Курдюмов, члени-кореспонденти В. Є. Васильєв, П. Г. Ємельяненко й І. М. Францевич. Після перебазування у 1953 р. у Дніпропетровськ частина Інституту виділилася в самостійні наукові установи, на базі яких були створені інститути проблем матеріалознавства та металофізики.

Безпосередньо Відділ (згодом Відділення) фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України було створено у червні 1963 р. в результаті реорганізації Відділу технічних наук.

Першим академіком-секретарем Відділу був видатний вчений в галузі порошкової металургії, досвідчений організатор науки, академік Іван Михайлович Федорченко, який незмінно очолював його протягом 25 років.

В той час до складу Відділу фізико-технічних проблем матеріалознавства входили чотири інститути: електрозварювання ім. Є. О. Патона; металокераміки і спеціальних сплавів, заснований у 1952 р., відокремившись від Інституту чорної металургії (з 1964 р. — Інститут проблем матеріалознавства); ливарного виробництва, створений у 1958 р. (зараз — Фізико-технологічний інститут металів та сплавів); машинознавства і автоматики, заснований у 1951 р. (з 1964 р. — Фізико-механічний інститут).

У 1972 р. до складу АН УРСР увійшли Інститут надтвердих матеріалів та Проектно-конструкторське бюро електрогідравліки (з 1991 р. — Інститут імпульсних процесів і технологій).

З 1988 по 2015 р. Відділенням натхненно та самовіддано керував видатний вчений, талановитий організатор науки, академік АН УРСР І. К. Походня. Ігор Костянтинович багато сил та енергії віддавав вдосконаленню координаційної діяльності Відділення, організації нових напрямів досліджень у галузі матеріалознавства, підготовці наукових кадрів, роботі з науковою молоддю, зміцненню матеріальної бази інститутів.

У 1990 р. створено Інститут термоелектрики подвійного підпорядкування (тепер НАНУ та МОН). У 1991 р. до НАН України перейшов НТК «Інститут монокристалів», а у 1992 р. — повернувся Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова.

Сьогодні до складу Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України входять 11 наукових установ.

Становлення Відділення відбувалося в час стрімкого розвитку промислового комплексу, зокрема, металургії, машинобудування, авіакосмічної галузі, атомної енергетики, будівництва транспортних сполучень та мостів, електроніки, що викликало гостру потребу у створенні нових матеріалів та вирішенні складних науково-технічних завдань. Якщо у 1930–1950 рр. найбільш нагальною потребою було забезпечення різних галузей економіки конструкційними матеріалами, то з розвитком атомної енергетики, космічної галузі, електроніки, медичної техніки зростала потреба в розширенні кола композиційних, інструментальних, жаростійких, надтвердих, радіаційностійких та інших функціональних матеріалів. В той же час з розвитком інфраструктур і експлуатацією великої кількості об'єктів відповідального призначення виникла потреба у створенні методів і засобів їх неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Наше Відділення завжди активно реагувало на нові вимоги часу, у багатьох випадках випереджаючи їх. Спрямовуючи таким чином фундаментальну науково-дослідницьку та прикладну технологічну діяльність на актуальні проблеми, інститути Відділення досягли визнаних у світі вагомих результатів. Цьому сприяло також практичне втілення концепції Б. Є. Патона про концентрацію наукової творчості на цілеспрямованих фундаментальних дослідженнях.

Так, за ініціативи вчених Відділення започатковано ряд цільових комплексних програм НАН України.

Всі інститути Відділення беруть участь у виконанні цільової наукової програми «Перспективні конструкційні та функціональні матеріали з тривалим терміном експлуатації, фундаментальні основи їх одержання, з'єднання та обробки». Крім того, інститути виконують фундаментальні і прикладні дослідження за проектами цільових наукових програм: «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд», «Фундаментальні аспекти від-



новлювально-водневої енергетики і паливно-комірчаних технологій», «Матеріали для медицини і медичної техніки та технології їх отримання і використання», «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій».

Інститути Відділення зробили великий внесок у розвиток матеріалознавчої науки, що суттєво вплинуло на процеси науково-технічного прогресу.

Діяльність Інституту електрозварювання — це ціла епоха розвитку вітчизняної науки і техніки в галузі зварювання та споріднених технологій. Проведено величезний комплекс фундаментальних досліджень фізико-технічних і теплофізичних процесів зварювання, механізмів плавлення, випаровування, кристалізації та конденсації металів, рафінування переплавів, міцності і надійності зварних з'єднань та конструкцій. Створені Інститутом технології знайшли застосування на землі, під водою і в космосі, а також для зварювання живих тканин. Роботи Інституту багато в чому визначили розвиток світової зварювальної науки і техніки.

Слід відмітити ряд досліджень і розробок, виконаних в Інституті останнім часом.

Розроблено технології контактного стикового зварювання пульсуючим оплавленням високоміцних рейкових сталей. Зварювальне устаткування модернізоване комп'ютеризованими системами автономного керування. Створені технології і обладнання впроваджуються на рейкозварювальних підприємствах ПАТ «Укрзалізниця» та широко експортуються за кордон.

Вперше у світовій практиці способом електронно-променевої плавки відпрацьовано технологію отримання бездефектних високоякісних зливків високоміцних титанових сплавів великих діаметрів з рівномірним розподілом легуючих елементів з перспективою впровадження у виробництві напівфабрикатів для потреб літакобудування та оборонного комплексу України.

Розроблено структуру проміжних прошарків на основі наночаруватої фольги та технологію отримання з їх допомогою нероз'ємних з'єднань різномірних жаростійких сплавів в твердій фазі з високим рівнем міцності, що відкриває нові можливості для створення елементів конструкцій аерокосмічного призначення.

Розроблено принципово новий спосіб вирощування монокристалів тугоплавких металів з одночасним використанням плазмово-дугового та індукційного нагріву. Створено унікальну виробничу ділянку з вирощування супервеликих монокристалів вольфраму і молібдену у вигляді пластин і тіл обертання.

Визначені та запропоновані для клінічного застосування оптимальні параметри процесу високочастотного зварювання різномірних живих тканин (шлунок, стравохід, тонка та товста кишка, жовчний міхур, нерви та сухожилля) та створено обладнання нового покоління для їх зварювання.

Інститутом матеріалознавства виконано масштабні фундаментальні дослідження, якими закладено фізико-хімічні основи створення нових неорганічних, металічних, керамічних, композиційних, наноструктурованих матеріалів із наперед заданими властивостями, зокрема, для експлуатації в екстремальних умовах. В активі Інституту унікальні результати дослідження фізики міцності конструкційних матеріалів з високою питомою міцністю і тугоплавких металів та сплавів, новітні технології порошкової металургії, високоефективні матеріали для систем отримання, зберігання і використання водню, зокрема, матеріали для керамічних паливних комірок. Слід відзначити, що Інститут став всесвітньовідомим центром сучасного матеріалознавства.

Наведу декілька прикладів останніх робіт.

В Інституті виконано фундаментальні дослідження, якими закладено фізико-хімічні основи створення нових неорганічних, металічних, керамічних, зокрема, оксидних матеріалів, що базуються на дослідженні фазових рівноваг та побудові невідомих раніше діаграм стану подвійних, потрійних і більш складних металічних і оксидних систем, а також поверхневих явищ у відповідних розплавах, процесів змочування та контактної взаємодії.

Методи порошкової металургії знайшли ефективне застосування в традиційних ливарних технологіях для позапічної обробки розплавів чавуну, сталі та сплавів на основі кольорових металів. Розроблені технології впроваджені у виробництві ґрунтообробної техніки і чавунних прокатних валків, забезпечивши суттєве підвищення ресурсу та стійкості робочих органів.

Значну увагу Інститут приділяє розробці матеріалів біомедичного призначення. Так, розроблено нові матеріали на основі титану, які леговані біоінертними домішками, зокрема, кремнієм, що сприяє кісткоутворенню. Їх перевагою є наблизений до кісток модуль пружності. Інші матеріали на основі гідроксилапатиту, синтетичного аналогу кісткової тканини, вже дозволили

Створення Української академії наук



**Павло Петрович
Скоропадський**
Гетьман Української держави
(1873-1945)



**Володимир Іванович
Вернадський**
Перший президент УАН,
вчений геолог і геохімік
(1863-1945)



**Микола Прокопович
Василенко**
Український вчений-історик,
громадський та політичний діяч
(1866-1935)

На пропозицію міністра освіти та мистецтва М. Василенка створили спеціальну комісію, яка від 9 липня до 17 вересня 1918 р. виробила законопроект про заснування Української академії наук, затверджений гетьманом П. Скоропадським 14 листопада 1918 р. Її урочисте відкриття відбулося 27 листопада 1918 р.

Керівники Відділу технічних наук (1936-1963 рр.)



**Святослав Павлович
Патон**
(1870-1953)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі зварювальних процесів і
мостобудування



**Олександр Миколайович
Джиник** (1876-1950)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі механіки та теорії
пружності



**Сергій Володимирович
Серенсен**
(1905-1977)
Академік АН УРСР, інженер-механік



**Георгій Федорович
Прескура**
(1876-1958)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі аерогідродинаміки і
гідромашинобудування



**Микола Миколайович
Доброхотов**
(1889-1963)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі металургії сталі і
теплотехніки



**Микола Васильович
Корноухов**
(1903-1958)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі будівельної механіки



**Костянтин
Костантинович Хрнов**
(1894-1984)
Академік АН УРСР,
український вчений у галузі
електроприводу



**Григорій Валентинович
Самсонов**
(1918-1975)
Член-кореспондент АН УРСР,
вчений у галузі хімії й технології
неорганічних матеріалів

Відділ фізико-технічних проблем матеріалознавства (1963-1988 рр.)



Іван Михайлович Федорченко
(1909-1997)
Перший академік-секретар Відділу, видатний
вчений у галузі порошкової металургії,
досвідчений організатор науки, академік

- Інститут електрозварювання;
- Інститут металокераміки і спецсплавів (з 1964 р. - Інститут проблем матеріалознавства);
- Інститут ливарного виробництва (з 1964 р. - Інститут проблем лиття, з 1996 р. - Фізико-технологічний інститут металів і сплавів);
- Інститут машинознавства і автоматики (з 1964 р. - Фізико-механічний інститут).

У підпорядкування АН УРСР перейшли:

- 1972 р. Інститут надтвердих матеріалів.
- 1972 р. Проектно-конструкторське бюро електротракторів, згодом у 1991 р. перейменовано на Інститут імпульсних процесів і технологій.

Видатні вчені Відділу технічних наук (1936-1963 рр.)



**Максим Власович
Луцинов**
(1889-1956)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі металургії



Зот Лаліч Некрасов
(1908-1990)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі чорної металургії



**Іван Микитович
Францевич**
(1905-1985)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі фізичної та неорганічної
хімії, порошкової металургії і
фізики твердого тіла



**Георгій Вячеславович
Кудряков**
(1902-1996)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі металознавства



**Киріло Федорович
Стародубов**
(1904-1984)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі металургії та
металознавства



**Олександр Петрович
Черкасов**
(1902-1975)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі металургії та обробки
металів тиском

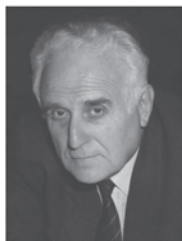


**Георгій Володимирович
Карпенко**
(1910-1977)
Академік АН УРСР, вчений у
галузі фізико-механіки металів



**Павло Терентійович
Смеляненко**
(1905-1947)
Член-кореспондент АН УРСР,
вчений у галузі обробки металів
тиском

Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства (1988-2015 рр.)



Ігор Костянтинівич Походня
(1927-2015 рр.)
Академік-секретар Відділення,
видатний вчений у галузі
матеріалознавства і електрозварювання,
академік НАН України

У підпорядкування АН УРСР
перейшли:

- 1990 р. Інститут термоелектрики подвійного підпорядкування (тепер НАНУ та МОН) на базі СКТЕ "ФОНОН" та проблемної лабораторії Чернівецького Університету.
- 1991 р. "НТК Інститут монокристалів" на базі НВО „Монокристалреактив”.
- 1992 р. Повернуто до складу АН УРСР Інститут чорної металургії, який у 1963 р. був підпорядкований Держкомітету РМ СРСР, а з 1965 до 1992 рр. - Міністерству чорної металургії СРСР.

Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства



Наразі до складу Відділення входять 23 академіки та 43 члена-кореспондента

провести у клініках України десятки тисяч стоматологічних, сотні ортопедичних та офтальмологічних операцій.

Розроблено низку сплавів із оптимальними питомими характеристиками для підвищення ефективності роботи авіаційних двигунів, зменшення їх ваги. Це, зокрема, високоміцні сплави алюмінію, жаростійкі та жароміцні сплави титану, сплави на основі ніобію та ультрависокотемпературні кераміки для газотурбінних двигунів.

В галузі наноматеріалів проведено дослідження нано- і мультифероїків, що мають пріоритет у світовій науці та можуть стати проривним кроком до мініатюризації електронної техніки, переходу до молекулярної електроніки. Інший приклад — однофазні мультифероїки з великим магнітоелектричним ефектом при кімнатній температурі, на основі яких розроблені високочутливі датчики для використання у медицині.



Інституту надтвердих матеріалів вдалося на вищому світовому рівні успішно вирішити важливу наукову проблему — створити промислову технологію синтезу алмазів з вуглецю у вигляді порошків і крупних монокристалів. Революційною подією став синтез надтвердих матеріалів — алмазу і кубічного нітриду бору. Створені високі технології одержання функціонально орієнтованих матеріалів і обробки металів і неметалів інструментом з надтвердих матеріалів. Розробки Інституту увійшли в історію розвитку науки і техніки України.

Вченими Інституту досягнуто значних успіхів у розробці технології вирощування крупних структурно досконалих монокристалів алмазу. Однією з цілей досліджень є цілеспрямоване формування центрів провідності та люмінесценції в кристалах, які дають змогу ефективно використовувати їх в електроніці для створення радіаційних детекторів.

Важливим напрямом є одержання надтвердих полікристалічних матеріалів, за яким створено спосіб одержання алмазного полікристалічного композиту алмаз–карбід кремнію, армований CVD алмазом для оснащення бурового інструменту.

Розроблено технології спікання та механічної обробки куль з карбіду бору для керамічних підшипників. Швидкохідні підшипники з керамічними кулями характеризуються незначним тертям і тепловиділенням при високих швидкостях і навіть при високих навантаженнях, вони менш чутливі до змащення й можуть працювати без змазки.

Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів розроблено принципи управління структуроутворенням та формуванням властивостей литих сплавів та виливків з них з використанням багатофакторного енергетичного та фізико-хімічного впливу на розплав. Розроблено теорію і технологію для отримання великих сталевих зливків високої якості. Створено ряд нових литих матеріалів, технологічних процесів та устаткування для потреб провідних галузей промисловості.

Відзначимо декілька з останніх досліджень.

Створено гібридний ливарно-лазерний процес та оригінальні конструкції реакторів, в яких відбувається лазерний нагрів частинок та формування суспензій. Визначено оптимальний спосіб перемішування розплаву з армуючими фазами.

Створено технологію та обладнання для одержання волокон і нанодисперсних лігатур різного хімічного складу, якими легують деформівні алюмінієві сплави. Їх використання дозволяє диспергувати структуру в безперервнолитих зливках, значно підвищуючи їх пластичність та міцність, в чому зацікавлені ряд провідних підприємств України.

Вперше створено магнітодинамічне обладнання для управління потоком алюмінієвого розплаву за допомогою керованих електромагнітних сил і мобільних систем збудження пульсуючого магнітного поля. Запропоноване технічне рішення є перспективним для одержання листової металопродукції стратегічного призначення на ливарно-прокатних комплексах.

У Фізико-механічному інституті закладено фундаментальні основи нової галузі науки — фізико-хімічної механіки матеріалів, яка сформована на стику матеріалознавства, механіки деформованого твердого тіла і хімічного опору матеріалів. Створена теорія деформування та руйнування матеріалів з урахуванням їх дефектності та дії робочих середовищ. На світовому рівні проведено широкий комплекс досліджень щодо вирішення проблем водневого матеріалознавства та корозії, а також створення фізичних основ та інформаційних технологій технічної діагностики і дистанційного контролю.

Наведу декілька прикладів робіт останніх років.

Для авіаційної техніки створено нові технології поверхневого зміцнення титанових виробів. Технології зміцнення базуються на формуванні структурно-фазового стану приповерхневих шарів окисдуванням і оксинітруванням. Результати діагностування обшивки фюзеляжу, крил літаків та лопастей гелікоптерів впроваджено на ДП «Мотор-Січ».

Методом мікробіологічного синтезу із відновлювальної сировини розроблено перспективний екологічно-безпечний інгібітор корозії металів і сплавів, призначений для захисту обладнання нафтогазової промисловості, машинобудування та інших галузей. Його використання дасть змогу знизити ступінь забруднення довкілля синтетичними засобами.

На основі розв'язків крайових задач теорії пружності вперше у світовій літературі встановлено зв'язки коефіцієнтів концентрації та інтенсивності напружень у тілах з гострими та закругленими кутовими вирізами. Такі залежності можна використати для побудови математичних моделей зародження та поширення тріщин біля вирізів за втомного навантаження.



У Науково-технологічному комплексі «Інститут монокристалів» досягнуто значних успіхів у розвитку матеріалознавства сцинтиляційних та люмінесцентних середовищ та створенні сцинтиляційних детекторів для жорстких умов експлуатації. Створено унікальні технології швидкісного вирощування великогабаритних монокристалів, зокрема, профільованих монокристалів сапфіру для виготовлення виробів широкого спектру призначення. Розробляються перспективні кристалічні матеріали для оптики і лазерної техніки. Хіміками комплексу створюються нові технології отримання матеріалів фармацевтичного та медико-біологічного призначення. НТК «Інститут монокристалів» досягнув значних успіхів у виході своєї науково-технологічної продукції на міжнародний ринок.

Ведеться розробка нових оксидних сцинтиляторів на основі алюмоіттрієвих гранатів як радіаційно стійких сцинтиляторів для апгрейду детекторів Великого адронного колайдера. Розроблено сцинтилятор оптимізованого складу із швидким часом загасання, що дозволить у майбутньому створити нові колайдерні детектори.

Створена технологія вирощування крупних кристалів сапфіру у відновлювальних газових середовищах методом горизонтальної спрямованої кристалізації.

Створено та оптимізовано технологічний маршрут отримання лазерних керамік із диференційною ефективністю лазерної генерації 60 % при діодній накачці на довжині хвилі 970 нм.

Створено високоефективні сорбційні матеріали для групового або селективного вилучення радіонуклідів з рідких радіоактивних відходів атомної промисловості. Україні конче потрібні такі матеріали, оскільки тільки на одному блоці АЕС за рік роботи накопичується до 1500 м³ відходів, а під час нештатних ситуацій ця кількість зростає в сотні разів.

В Інституті чорної металургії вперше у світовій практиці під керівництвом академіка З. І. Некрасова розроблено теоретичні, технологічні та практичні засади технології плавки для доменних печей великого об'єму, використання у доменній плавці природного газу та дуття, збагаченого киснем. Подальший розвиток доменної плавки здійснено за рахунок раціонального розподілу шихтових матеріалів та застосування ефективних систем контролю технологічного процесу. Широкого розповсюдження у практиці металургійного виробництва набули роботи у галузі сталеплавильного виробництва, термічної та термомеханічної обробки прокату.

Зокрема, нещодавно в Інституті виконано комплекс робіт з підвищення якості металопродукції для залізничного транспорту, встановлено закономірності формування рівномірної зеренної структури перліту в залізничних колесах зі сталей різного складу. Впровадження отриманих результатів забезпечило зменшення браку залізничних коліс, бандажів та колісних центрів; вдосконалено моделі доменного процесу, що покладені в основу створеної вперше вітчизняної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменною плавкою, яка дозволяє в оперативному режимі діагностувати хід печі, корегувати параметри процесу та видавати рекомендації з його оптимізації; створено і введено в експлуатацію комплекс позапічної десульфурзації чавуну і видалення шлаку в 350-тонних ковшах на сталеплавильному заводі.

Інститут імпульсних процесів і технологій розробив наукові основи розрядно-імпульсних технологій, розвинув теорію електровибухового перетворення енергії в конденсованих середовищах, сформулював фізичні аспекти підводного високовольтного розряду. Створено імпульсні джерела енергії високої густини, унікальні гідроакустичні випромінювачі, системи управління розрядно-імпульсними процесами обробки і синтезу матеріалів. Розроблені технології широко використовуються для підвищення дебіту нафтових та водяних свердловин, холодної листової штамповки сплавів, очищення литва, очищення підводних металоконструкцій від біологічного обростання, приготування водно-вугільного палива тощо.

Нещодавно, враховуючи високу потребу автомобіле- та літакобудування в деталях із алюмінієвих сплавів, в Інституті розроблено спосіб їх комбінованого імпульсно-статичного пластичного деформування, що дозволяє отримувати деталі складної форми з глибокою витяжкою і 100%-им заповненням кутів і згинів. Додатковою перевагою способу є значна економія електроенергії.

В Інституті термоелектрики відкрито закон термоелектричної індукції струму, на основі якого створено принципово нову узагальнену теорію термоелектричного перетворення енергії. На основі розвинутого термоелектричного матеріалознавства розроблено методи винайдення нових типів термоелементів, розширено елементну базу термоелектрики, створено велику кількість термоелектричних приладів. Серед них прилади космічного призначення, що вста-



новлені майже на двохстах п'ятидесяти супутниках Землі. Інститут займає провідні позиції на світовому рівні щодо вирішення сучасних наукових проблем термоелектрики і створення термоелектричної апаратури.

Зокрема, в Інституті започатковано принципово нові контактні і комутаційні композитні структури на екструдованих термоелектричних матеріалах для термоелектричних перетворювачів енергії. Результати використано при створенні термоелектричних модулів охолодження, які постачаються французькій аерокосмічній фірмі та призначені для охолодження та термостабілізації ПЗС матриць в системах орієнтації низькоорбітальних та геостационарних супутників.

Високий науковий і науково-технічний рівень досліджень, проведених ученими Відділення, їх вагомий внесок у вирішення важливих для держави галузевих науково-технічних завдань, відзначено численними Державними та іменними преміями. Роботи учених Відділення отримали 64 Державних премій СРСР, 60 премій Ради міністрів СРСР, 131 Державну премію України в галузі науки і техніки, 4 премії Кабінету Міністрів України, 106 премій імені видатних вчених НАН України.

Хочу відзначити, що інститути нашого Відділення мають високий науковий потенціал, достатній для того, щоб зробити ще більший внесок у розвиток матеріалознавчої науки, посилити її вплив на процеси науково-технічного прогресу. Подальший розвиток наукоємних галузей економіки, серед яких атомна й теплова енергетика, авіакосмічна техніка, машино-, судно- та приладобудування, транспорт, електроніка, хімічна промисловість, будівництво, потребує створення перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, здатних забезпечити працездатність виробів та об'єктів довготривалої експлуатації, що працюють в умовах високих статичних, циклічних та динамічних навантажень, під дією агресивних середовищ, радіаційного опромінення, високих і низьких температур.

Перспективні дослідження та розробки вчених у галузі матеріалознавства слід зосередити, насамперед, на фундаментальних проблемах створення матеріалів із наперед заданими властивостями та науково-обґрунтованих методах їх з'єднання, обробки і діагностування. Пріоритетного розвитку повинні набувати такі напрями, як нові конструкційні матеріали з високою питомою міцністю, сучасні керамічні та композиційні матеріали, наноструктуровані матеріали, оптичні та лазерні матеріали, новітні технології зварювання та адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі використання висококонцентрованих джерел енергії, новітні кристалічні та композиційні функціональні матеріали для фізики високих енергій, оптоелектроніки, радіаційного, хімічного і екологічного моніторингу, ефективні технології захисту металів від корозії.

Актуальними є дослідження й розробки нових технологій порошкової металургії, інженерії поверхні і одержання монокристалічних і надтвердих матеріалів, створення термоелектричних матеріалів і приладів різноманітного призначення. Також розширюватимуться роботи зі створення матеріалів, технологій і обладнання медичного призначення, зокрема, приладів та технологій для зварювання живих тканин, біосумісних і біоактивних матеріалів, ендопротезів, штучних кісток, стентів тощо.

Щодо перспективних матеріалів для сучасної промисловості слід відзначити необхідність розроблення та впровадження технологій для створення в Україні виробництва високоміцних рейок для швидкісних залізничних магістралей з тривалим ресурсом експлуатації, технологій виробництва високоміцного металопрокату масового призначення з економнолегованих сталей для залізничних вантажних вагонів нового покоління та будівництва. Необхідні також розроблення і впровадження ультрависокотемпературної кераміки та нових металевих матеріалів для газотурбінних двигунів авіаційної і космічної техніки та енергомашинобудування; нових зносостійких матеріалів для ґрунтообробної та переробної сільськогосподарської техніки, металургійного і гірничовидобувного обладнання; новітніх металогідридних матеріалів для отримання та акумулювання водню в технологіях відновлювально-водневої енергетики. Складно переоцінити актуальність вирішення проблем управління експлуатаційною надійністю та довговічністю відповідальних виробів та об'єктів шляхом оцінки та моніторингу їх технічного стану, а відтак є необхідність створення нових досконалих методів і засобів технічної діагностики та подовження ресурсу конструкцій, машин та обладнання.

Одним з головних пріоритетів діяльності установ Відділення і надалі буде залишатися наукове забезпечення вирішення актуальних завдань оборонної тематики.



Сьогодні для українських вчених все більше значення набуває належність до міжнародної спільноти.

Для залучення додаткових джерел фінансової підтримки, оновлення матеріально-технічної бази, проведення спільних досліджень та стажування науковців за кордоном наші інститути виконують міжнародні контракти, проекти, гранти. Ними налагоджені широкі науково-технічні зв'язки з провідними науковими центрами та фірмами Західної Європи, а також США, Канади, Японії, Китаю, республіки Корея та ін.

Зокрема, активну участь установи Відділення приймають у міжнародній конкурсній тематиці. На сьогодні виконується близько 40 грантів Європейського Союзу у Сьомій рамковій програмі, програмах HORIZONT 2020, УНТЦ, INTAC, NATO, CRDF та інших.

За міжнародними контрактами останніми роками інститутами Відділення було виготовлено, випробувано і поставлено електронно-променеві установки для зварювання і нанесення покриттів, обладнання для контактної-стикового зварювання; комплект електрогідроімпульсного свердловинного пристрою; реалізовано на експорт різальні пластини з кубічного нітриду бору, алмазні правлячі ролики, сцинтиляційні елементи на основі кристалів селеніду цинку, а також вироби з оптичної кераміки, біокераміки, ультрависокотемпературної кераміки та інша науково-технічна продукція і науково-дослідні послуги.

Проводилася міжнародна співпраця у галузях доменного виробництва, позапічної обробки металу, виробництва сталі, металознавства, термічної та термомеханічної обробки металу, металургійного машинознавства; вирішенні проблем корозії та корозійно-втомного руйнування конструкційних металів та сплавів в умовах впливу тропічного морського клімату; створенні електророзрядних технологій очищення стічних промислових та комунальних вод, газових викидів ТЕС, морських стаціонарних платформ від біологічного обростання тощо.

Слід відмітити, що два інститути Відділення організували спільні наукові китайсько-українські центри: Китайсько-український інститут зварювання ім. Є. О. Патона та Китайський науково-технологічний центр Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

Вчені Відділення виїжджають за кордон з метою проходження наукового стажування, участі у міжнародних конференціях, організаціях, комісіях, переговорах про взаємне співробітництво, викладання лекцій. Вони також приймають іноземних вчених та спеціалістів у своїх інститутах для обговорення виконання робіт за договорами та грантами. Особливо останнім часом помітне розширення співробітництва з Китаєм. Позитивним прикладом в цьому відношенні є велика Міжнародна конференція «Передові матеріали та технології», що була проведена 24–26 жовтня цього року у китайському місті Нінхау, у якій прийняли участь 60 українських фахівців, головним чином із інститутів нашого Відділення.

Попри досить активну співпрацю, яка, на жаль, в деяких випадках часом обмежується фінансовими можливостями установ щодо оплати командировань, слід відзначити, що нам варто більше уваги приділяти питанням розширення участі у міжнародних проектах, особливо у програмі Горизонт 2020. При цьому треба враховувати, що вже зараз відбувається обговорення тематичних напрямів дев'ятої рамкової програми Європейської спільноти.

Також необхідно і надалі підтримувати і зміцнювати зв'язки з провідними вузами України, які передбачають спільні наукові дослідження, викладацьку діяльність, керування підготовкою бакалаврів та магістрів, сприяння проведенню виробничої та дипломної практик, участь у роботі спеціалізованих вчених рад, надання робочих місць молодим спеціалістам і залучення їх до аспірантури.

Всі ми знаємо труднощі, які відчуває у теперішній час Національна академія наук України і наше Відділення. Це перш за все катастрофічне недофінансування, низька заробітна плата, дефіцит сучасного дослідницького обладнання, непривабливість наукової діяльності в Україні для молоді, плінність молодих кадрів за кордон, проблеми з житлом, надмірні площі в інститутах, які неможливо підтримувати у робочому стані при сьогоднішніх тарифах на комунальні послуги, а також несприйняття інновацій промисловістю. Але незважаючи на це інститути Відділення зустрічають 100-річний ювілей нашої Академії новими та значними науковими досягненнями. І надалі, попри усі труднощі, нам необхідно наполегливо працювати.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО СПЛАВА 29НК ПРИ ЭШП С ПОРЦИОННЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СЛИТКА

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

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

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

Приведены результаты изучения особенностей формирования структуры слитков прецизионного сплава 29НК, полученных способом электрошлакового переплава с порционным формированием. Слитки диаметром 84 и 120 мм выплавляли путем переплава расходимых электродов в камерной электрошлаковой печи в импульсном режиме, обеспечивающем периодичность процессов плавления и кристаллизации металла. Это достигалось за счет циклического изменения электрического напряжения на ванне от рабочих значений, до значений, при которых плавление электрода прекращалось. Показано, что рациональный выбор режимов электрического питания во время импульсов и пауз плавления металла позволяет сохранить устойчивость электрошлакового процесса и хорошее качество формирования боковой поверхности слитка. При этом открываются дополнительные возможности управления структурообразованием металла ЭШП с получением слитков с плотной структурой, без пористости, включений, крупных столбчатых кристаллов и зоны встречной кристаллизации по оси слитка. Библиогр. 8, табл. 1, ил. 4.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; прецизионные сплавы; ковар; слиток; порционное формирование; кристаллизация; макроструктура

Сплав 29НК (ковар) относится к классу прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и имеет следующий химический состав, мас. %: Fe — основа; Ni — 28,5...29,5; Co — 17,0...18,0 [1–3]. Его ТКЛР близок к ТКЛР стекла и керамики, при этом сплав отличается высокой адгезией к расплавленному стеклу и поэтому широко используется для изготовления вакуумно-плотных электрических выводов, проходящих через стекло и керамику.

Применение сплавов такого типа в электровакуумной технике и электронике связано с обеспечением строго заданных физических свойств металла. Поэтому к ним предъявляются повышенные требования по химическому составу, однородности, чистоте (отсутствие вредных примесей и включений).

Свойства металла, определяющие качество продукции, достигаются, прежде всего, за счет обеспечения химической и структурной однородности исходного слитка. В слитках прецизионных сплавов ЭШП различные формы химической неоднородности в большей или меньшей степени связаны с дендритной ликвацией [4]. Поэтому актуальной задачей при выплавке прецизионных сплавов является поиск способов ее снижения.

Образование в металле слитков ЭШП дефектов ликвационного характера следует рассматривать во взаимосвязи с условиями формирования их

структуры при кристаллизации, зависящими от следующих основных факторов [5–7]:

- скорости переплава;
- условий охлаждения жидкой металлической ванны и температурного градиента на фронте затвердевания;

- образования перед фронтом затвердевания двухфазной зоны, ширина которой определяется химическим составом и свойствами сплава;

- структуры и интенсивности гидродинамических течений в ванне и двухфазной зоне;

- характера передачи тепла металлической ванне шлаком и каплями жидкого металла.

Приведенные выше факторы определяют глубину и форму жидкой металлической ванны, а следовательно и теплофизические условия формирования структуры металла слитка.

Наиболее благоприятные условия, с точки зрения структурообразования металла и снижения ликвационных процессов, создаются при поддержании в процессе ЭШП неглубокой жидкой металлической ванны с плоским фронтом кристаллизации. Однако при классической схеме ЭШП не всегда удается получить желаемую структуру металла при сохранении стабильности электрошлакового процесса и качественного формирования боковой поверхности слитка. Так, уменьшение скорости переплава, приводящее к уменьшению глубины металлической ванны и улучшению

структуры и однородности металла, одновременно приводит к недопустимому ухудшению формирования поверхности слитка.

В связи с этим практический интерес представляет исследование процесса ЭШП, который ведется в импульсном режиме с послойным формированием слитка.

Как известно, температуру шлаковой ванны можно изменять в широких пределах путем регулирования электрического напряжения на ней. По сути нижний предел температуры шлаковой ванны ограничен температурой затвердевания флюса, а верхний — закипания.

Температура плавления большинства флюсов для ЭШП сталей и сплавов на основе никеля и кобальта находится в пределах 1100...1400 °С, т. е. существенно ниже температуры плавления переплавляемого металла [8]. Это дает возможность, снижая напряжение на ванне в процессе ЭШП ниже определенного уровня, создавать такие условия, при которых будет поддерживаться жидкая электропроводная шлаковая ванна, а расходующий электрод плавиться не будет. За счет этого, циклически изменяя напряжение на ванне и соответствующим образом регулируя скорость подачи расходующего электрода, можно обеспечить периодичность плавления электрода и послойное формирование металла слитка.

Следует подчеркнуть, что современные тиристорные регуляторы с рабочими токами в десятки килоампер позволяют в процессе ЭШП изменять в широких пределах и по заданной программе напряжение на ванне и вводимую мощность, расширяя тем самым возможности управления процессом плавки и кристаллизацией слитка.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании технологических и металлургических особенностей процесса ЭШП прецизионного сплава 29НК с периодическим плавлением расходующего электрода и порционным (послойным) формированием слитка и изучении закономерностей структурообразования выплавленного металла.

Основными параметрами, определяющими порционное формирование слитка ЭШП, являются объем отдельных порций наплавленного металла и продолжительность выдержки, обеспечивающей полную или частичную кристаллизацию ранее расплавленной порции. В свою очередь первый параметр задается скоростью плавки и продолжительностью соответствующих периодов (импульсов) электрического питания, второй — продолжительностью периодов снижения напряжения на ванне (пауз плавления электрода) и режимами подогрева шлаковой ванны в эти периоды времени.

Одной из важных задач при порционном формировании слитка ЭШП является обеспечение надежного соединения отдельных порций металла без каких-либо дефектов в зоне сплавления. Свойства этой зоны в значительной мере определяются температурными режимами шлаковой ванны при паузах плавления электрода, а также переходными процессами в периоды между паузами и импульсами плавления. При этом следует учитывать, что при наплавлении очередной порции металла происходит термоциклическое воздействие на ранее наплавленные объемы металла с их частичным расплавлением и последующей перекристаллизацией.

В целом для обеспечения требуемых свойств переходной зоны желательно, чтобы в процессе порционного переплава на поверхности формирующегося слитка все время оставался слой жидкого металла. Это достигается выбором продолжительности пауз плавления электрода и температуры подогрева шлаковой ванны в эти периоды.

При выборе объема отдельных порций наплавленного металла следует исходить из условий структурообразования металла и технико-экономических показателей процесса переплава. При чрезмерно большом объеме отдельных порций металла характер структурообразования в пределах каждого наплавленного слоя может ухудшаться с формированием крупных столбчатых кристаллов, ориентированных в направлении теплоотвода. В свою очередь уменьшение объема отдельных порций металла ниже определенного значения также нецелесообразно, так как оно не приводит к заметному улучшению качества металла, однако существенно снижает производительность процесса переплава. В целом высоту отдельных порций металла можно рассматривать как функцию от диаметра слитка.

С учетом изложенных выше положений были проведены экспериментальные исследования процесса ЭШП с порционным формированием слитков сплава 29НК диаметрами 84 и 120 мм. Плавки осуществляли в печи камерного типа в атмосфере аргона с использованием солевого фторидно-хлоридного флюса.

Плавки проводили следующим образом. После наведения шлаковой ванны и выхода на заданные электрические режимы включали аппаратуру управления, изменяющую по заданной программе напряжение в процессе ЭШП. После расплавления порции электродного металла заданного объема напряжение на ванне снижалось до значений, при которых прекращалось плавление электродного металла (7,5...9,0 В). Одновременно прекращали подачу расходующего электрода. Шлаковую ванну в этот период поддерживали в жидком состоянии

за счет ее подогрева электрическим током, величина которого уменьшалась пропорционально электрическому напряжению на ванне и увеличению сопротивления межэлектродного промежутка. В экспериментах периоды пауз плавления электрода составляли 180 и 300 с. Затем электрическое напряжение на ванне увеличивали до рабочего значения (37...38 В), осуществляли подачу электрода и повторяли описанные выше циклы (рис. 1). Тем самым обеспечивалась периодичность процессов плавления электрода и кристаллизации металла по высоте слитка.

Изменение напряжения в процессе переплава происходило автоматически за счет программируемого логического модуля и тиристорного регулятора, расположенного в первичной цепи силового трансформатора ТШП 10000/1. Изменение скорости подачи расходуемого электрода выполняли в ручном режиме. Режимы плавки приведены в таблице. Внешний вид, макроструктура и схема кристаллизации выплавленных слитков показаны на рис. 2–4.

Слиток 1 выплавлен при продолжительности импульсов и пауз плавления электрода 60 и 180 с соответственно. Процесс плавки проходил стабильно. Слиток характеризовался хорошим формированием боковой поверхности, на которой четко определялись шесть слоев кристаллизации (рис. 2, а). Высота отдельного наплавленного слоя составляла в среднем 33 мм. При переходе от слоя к слою на поверхности слитка имелись незначительные пережимы, глубина которых не превышала 1 мм.

Макроструктура слитка, за исключением его головной части, плотная, без пор, шлаковых включений, несплавлений и прочих дефектов. Она характеризуется наличием преимущественно столбчатых кристаллов (рис. 2, в), которые в придонной (1) и осевой (2) частях слитка ориентированы вертикально, а возле боковой стенки (3) — горизонтально. При этом ширина зоны горизонтально ориентированных кристаллов циклически изменяется по высоте слитка, что является характерным признаком его порционного формирования. Эта зона формируется во время пауз электропитания в условиях интенсивного охлаждения металла стенками кристаллизатора. Четко выраженных границ

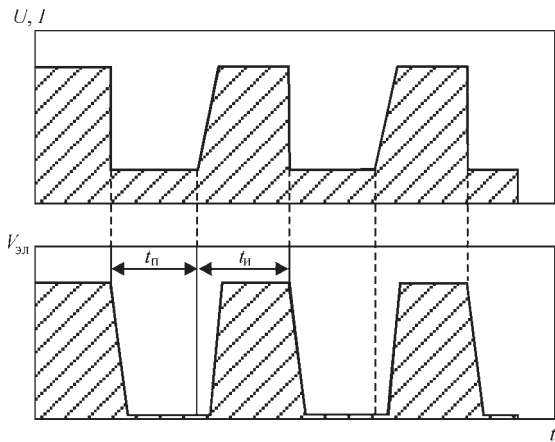


Рис. 1. Условная циклограмма изменения напряжения (U), тока (I) и скорости подачи электрода ($V_{эл}$) в процессе плавки: $t_{п}$, $t_{п}$ — продолжительности импульсов и пауз плавления электрода соответственно

раздела между слоями кристаллизации не наблюдается. Необходимо обратить внимание на отсутствие зоны слабины по оси слитка характерной для слитков ЭШП малого диаметра. Участок 4 в головной части слитка характеризуется наличием усадочной раковины на глубине до 15 мм, что свидетельствует о необходимости тщательного соблюдения режимов ее выведения на заключительном этапе плавки.

При выплавке слитка 2 продолжительность периодов плавления электрода была уменьшена до 33 с при паузах плавления составляющих 180 с (таблица). Высота отдельных порций наплавленного металла в данном случае составляла около 20 мм. Выплавленный слиток имел хорошее формирование боковой поверхности с незначительными пережимами в местах перехода от слоя к слою (рис. 3, а).

Макроструктура металла плотная, состоит из различных зон, образование которых обусловлено порционным плавлением и кристаллизацией металла с возможностью частичного подплавления, а также перекристаллизацией отдельных его объемов.

По высоте слитка (рис. 3, в) четко проявляются горизонтальные участки послойного структурообразования, состоящие из зон вертикально ориентированных кристаллов (2), чередующихся с участками с мелкозернистой равноосной структурой (3). Толщина этих мелкокристаллических слоев не-

Режимы выплавки слитков сплава 29НК										
Номер плавки/слитка	Диаметр, мм		Продолжительность, с		Скорость подачи электрода, м/ч		Напряжение, В		Ток, А	
	электрода	слитка	импульса	паузы	импульс	пауза	импульс	пауза	импульс	пауза
1	50	84	60	180	3,3	0	38	7,5	3200...3500	300...500
2	50	84	33	180	3,5	0	38	7,5	3500...4000	300...500
3	80	120	70	300	2,4	0	37	9,0	4500...5500	850...1000

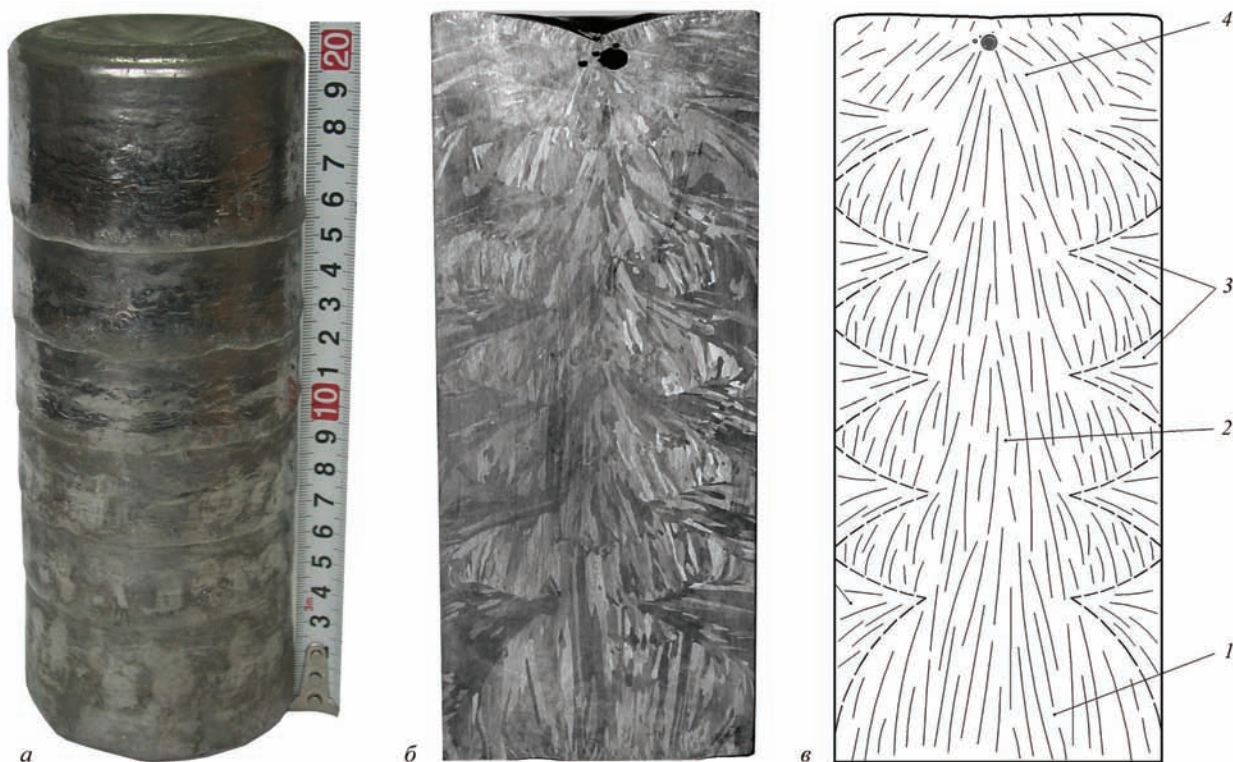


Рис. 2. Внешний вид (а), макроструктура (б) и схема кристаллизации (в) слитка сплава 29НК (плавка 1): 1 — придонная зона вертикально ориентированных кристаллов; 2 — центральная (осевая) зона вертикально ориентированных кристаллов; 3 — зоны горизонтально ориентированных кристаллитов у боковой поверхности слитка; 4 — зона в головной части слитка

сколько увеличивается по высоте слитка и стабилизируется на высоте равной его диаметру. Дисперс-

ность структуры участков столбчатых кристаллов 2, за исключением придонной зоны 1, существен-



Рис. 3. Внешний вид (а), макроструктура (б) и схема кристаллизации (в) слитка сплава 29НК (плавка 2): 1 — придонная зона вертикально ориентированных кристаллов; 2 — зоны вертикально ориентированных кристаллов в центральной части слитка; 3 — зоны с мелкозернистой равноосной структурой; 4 — зона горизонтально ориентированных кристаллитов у боковой поверхности слитка; 5 — зона разориентированных кристаллов в головной части слитка



Рис. 4. Внешний вид (а), макроструктура (б) и схема кристаллизации (в) слитка сплава 29НК (плавка 3): 1 — зоны вертикально ориентированных кристаллов; 2 — зона горизонтально ориентированных кристаллов; 3 — линии сплавления

но выше, чем в слитке 1. У боковых поверхностей слитка сформирована зона 4 с горизонтальной ориентацией кристаллов, ширина и дисперсность которой мало изменяется по высоте слитка. Головная часть слитка 5 характеризуется разориентированной структурой без усадочной пористости.

В целом дисперсность структуры слитка 2 значительно выше, чем у аналогичных слитков, полученных по традиционной технологии ЭШП.

Слиток 3 диаметром 120 мм выплавлен при продолжительности импульсов и пауз плавления электрода 70 и 300 с соответственно (см. таблицу). Поверхность слитка сформирована хорошо, глубина характерных пережимов на его поверхности не превышает 2 мм (рис. 4, а). Макроструктура металла плотная, каких-либо дефектов в поле макрошлифа не обнаружено (рис. 4, б). В центральной части слитка кристаллы ориентированы преимущественно вертикально, периферийные зоны (около боковой поверхности) характеризуются ростом кристаллов, направленных к центру слитка. Дисперсность столбчатых кристаллов в центральной части достаточно высока, «прорастания» кристаллов от слоя к слою не наблюдается. Границы между отдельными слоями кристаллизации выявляются четко (на рис. 4, в показаны условно в виде черных линий 3). При этом следует отметить отсутствие каких-либо дефектов (микропор, шлаковых включений и пр.) по зонам сплавления. Тем не менее наличие выраженных границ раздела между отдельными порциями наплавленного металла носит, скорее, негативный характер, так как может приводить к анизотропии свойств металла в этих зонах.

Анализ структуры выплавленных слитков показал ряд положительных эффектов, обусловлен-

ных порционным плавлением и затвердеванием металла ЭШП. Все слитки имеют плотную структуру, без пористости и неметаллических включений, характеризуются отсутствием крупных столбчатых кристаллов и зоны встречной кристаллизации по оси слитка. При выборе рациональных режимов порционного формирования слитка «прорастания» кристаллов от слоя к слою не наблюдается, т. е. максимальная длина кристаллов ограничивается высотой отдельного наплавленного слоя. В целом дисперсность структуры металла выплавленных слитков сплава 29НК существенно выше, чем у аналогичных слитков традиционного ЭШП. Следовательно порционное тепловложение дает возможность, в той или иной степени, управлять процессом кристаллизации слитков ЭШП. Эффективность такого управления и выбор соответствующих режимов зависит, прежде всего, от химического состава сплава, размеров выплаваемого слитка и условий его охлаждения.

Таким образом, проведенные эксперименты показали широкие возможности управления структурообразованием металла слитков при ЭШП за счет ведения процесса в импульсном режиме, обеспечивающем периодическое порционное плавление и затвердевание металла. При этом выбор рациональных режимов электрического питания во время импульсов и пауз плавления металла позволяет сохранить устойчивость электрошлакового процесса и хорошее качество формирования боковой поверхности слитка.

Дальнейшие работы будут направлены на изучение закономерностей структурообразования слитков большего диаметра, отработку режимов изменения параметров процесса на переходных

етапах и исследование свойств металла, включая зону сплавления.

Список литературы

1. ГОСТ 10994–74. Сплавы прецизионные. Марки. Межгосударственный стандарт.
2. Молотиллов Б. В. (ред.). (1983) *Прецизионные сплавы*. Справочник. Москва, Металлургия.
3. Грицианов Ю. А., Путимцев Б. Н., Молотиллов Б. В. (1975) *Металлургия прецизионных сплавов*. Москва, Металлургия.
4. Голиков И. Н., Масленков О. Б. (1977) *Дендритная ликвация в сталях и сплавах*. Москва, Металлургия.
5. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Шевцов В. Л. и др. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б. Е. (ред.). Киев, Наукова думка.
6. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М. (1990) *Качество электрошлакового металла*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
7. Митчелл А. (2008) Кристаллизация металла в процессах переплава. *Современная электрометаллургия*, 2, 4–13.
8. (2016) *Выбор оптимального флюса — залог успеха при электрошлаковом переплаве*. https://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/632_RU.pdf

References

1. GOST 10994–74: Precision alloys. Grades. Intergovernmental standard [in Russian].
2. (1983) *Precision alloys*: Refer. Book. Ed. by B.V. Molotilov. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Gritsianov, Yu.A., Putimtsev, B.N., Molotilov, B.V. (1975) *Metallurgy of precision alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Golikov, I.N., Maslenkov, O.B. (1977) *Dendritic segregation in steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Dyachenko, D.M. (1990) *Quality of electroslag metal*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Mitchell, A. (2008) Solidification of metal in remelting processes. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 3–11.
8. (2016) *Selection of optimal flux — guarantee of success in electroslag remelting*. https://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/632_RU.pdf

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО СПЛАВУ 29НК ПРИ ЕШП З ПОРЦІЙНИМ ФОРМУВАННЯМ ЗЛИВКА

І. В. Протоковілов, О. Т. Назарчук, Д. А. Петров, В. Б. Порохонько

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

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

Наведено результати вивчення особливостей формування структури зливків прецизійного сплаву 29НК, отриманих способом електрошлакового переплаву з порційним формуванням. Зливки діаметром 84 і 120 мм виплавляли шляхом переплаву витратних електродів в камерній електрошлаковій печі в імпульсному режимі, що забезпечує періодичність процесів плавлення і кристалізації металу. Це досягалося за рахунок циклічної зміни електричної напруги на ванні від робочих значень, до значень, при яких плавлення електрода припинялось. Показано, що раціональний вибір режимів електричного живлення під час імпульсів і пауз плавлення металу дозволяє зберегти стабільність електрошлакового процесу і добру якість формування бокової поверхні зливка. При цьому відкриваються додаткові можливості управління структуроутворенням металу ЕШП з отриманням зливків з щільною структурою, без пористості, включень, великих стовпчастих кристалів і зони зустрічної кристалізації по осі зливка. Бібліогр. 8, табл. 1, іл. 4.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; прецизійні сплави; ковар; зливок; порційне формування; кристалізація; макроструктура

FEATURES OF STRUCTURE FORMATION IN THE PRECISION ALLOY 29NK IN ESR WITH A PORTION INGOT FORMATION

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

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

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

The results of studying the features of structure formation in the ingots of the precision alloy 29NK are given, produced by electroslag remelting with a portion formation. The ingots with a diameter of 84 and 120 mm were melted by remelting consumable electrodes in a chamber electroslag furnace in a pulsed mode, providing the periodicity of processes of melting and crystallization of metal. This was achieved due to cyclical variation of electric voltage on the pool from the operating values to the values at which the melting of the electrode stopped. It is shown that a rational choice of electric supply modes during pulses and pauses of metal melting allows maintaining the stability of electroslag process and a good quality of the formation of the side surface of the ingot. At the same time, additional possibilities are opened for controlling the structure formation in the ESR metal with producing ingots having a dense structure, without porosity, inclusions, large columnar crystals and a zone of counter crystallization along the axis of the ingot. Ref. 8, Tabl. 1, Fig. 4.

Key words: electroslag remelting; precision alloys; kovar; ingot; portion formation; crystallization; macrostructure

Поступила 12.11.2018

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ВЫПЛАВКА ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ NiCrAlY, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ КАТОДОВ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Н. И. Гречанюк¹, Ю. А. Смашнюк², Е. В. Хоменко¹,
В. В. Клочихин³, И. Н. Гречанюк²

¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины.

03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²НПП «ЭЛТЕХМАШ».

21011, г. Винница, ул. Ватутина, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

³АО «Мотор-Сич».

69068, г. Запорожье, просп. Машиностроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorcich.com

Разработана экспериментальная электронно-лучевая технология получения трубных заготовок из сплавов NiCrAlY, используемых в качестве катодов при нанесении жаростойких покрытий ионно-плазменным методом. Установлено, что покрытия, нанесенные на лопатки газовых турбин авиационных двигателей с использованием катодов электронно-лучевой выплавки, соответствуют требованиям ТУ АО «Мотор-Сич» на данный вид изделий. Библиогр. 12, табл. 1, ил. 5.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; жаростойкие сплавы; покрытия; лопатки газовых турбин; ионно-плазменное нанесение

Материалы NiCrAlY используются для защиты жаропрочных сплавов на основе никеля от высокотемпературного окисления и широко применяются в качестве внутреннего связующего металлического слоя в составе термобарьерных покрытий на лопатках газотурбинных двигателей (ГТД), выполняя не только защитные функции, но и снижая разницу в коэффициенте термического линейного расширения между основой и керамическим внешним слоем. Температура газа перед входом в проточную часть в современных ГТД достигает 1700 К. В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию газотурбинных двигателей с рабочей температурой до 2000 К. Жесткие условия эксплуатации лопаток ГТД, связанные с многократной сменой теплового режима при воздействии газовых потоков, насыщенных продуктами сгорания топлива, обуславливают особые требования, предъявляемые к качеству нанесения покрытий на основной материал. Поиски оптимальных технологий для формирования качественного слоя, наносимого на материал лопаток, начатые еще в конце 80-х годов прошлого столетия, показали высокую эффективность ионно-плазменного метода с применением в качестве катодов трубчатых литых заготовок, изготовленных из высокочистых сплавов NiCrAlY [1].

В большинстве случаев литые заготовки подвергаются прокатке, волочению, механической и другим видам обработок для последующего изготовления из них изделий трубчатой формы. Применение многократных технологических переделов приводит к существенному увеличению стоимости изделий и поэтому разработка технологий, позволяющих получить заготовки с последующими минимальными механической, термической и другими видами обработок, остается основной проблемой их производства. Системные исследования по разработке технологий получения трубчатых заготовок из медных, циркониевых, титановых и других сплавов проводятся в Институте электросварки им. Е. О. Патона и Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины, в Международной кампании «АНТАРЕС» и др. [2–4].

Перспективным направлением в развитии этой технологии является применение электронно-лучевой плавки (ЭЛП), широко используемой для получения слитков (слябов) металлов и сплавов высокой чистоты [5]. Однако получение качественных трубчатых заготовок из жаростойких сплавов на никелевой основе способом ЭЛП представляет достаточно сложную техническую задачу, что обусловлено существенным различием

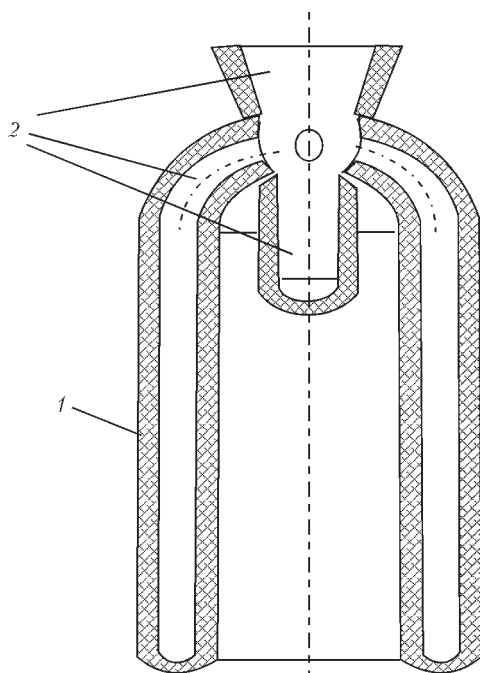


Рис. 1. Схема керамической оболочковой формы для отливки трубных заготовок: 1 — цилиндрическая оболочковая часть; 2 — литниково-питающая система с заливочной чашей

физико-химических характеристик компонентов сплава и технологическими трудностями получения полых изделий из этих сплавов [6, 7]. Поэтому на начальном этапе внедрения ионно-плазменного оборудования в 1981 г. (установка МАП-1 с вакуумно-дуговым способом испарения, разработанная ВИАМ, РФ) для изготовления катодов использовали слитки соответствующих сплавов, которые подвергали сверлению и последующей механической обработке внутренней и внешней частей полый заготовки до требуемых геометрических размеров. Указанная технология является чрезвычайно трудоемкой и затратной особенно при изготовлении катодов из сплавов МЗП6 и СДП2 (Ni-18...24 мас. %, Cr-10...14 мас. %, Al-0,4...1,0 мас. %, Y), обладающих повышенными твердостью и хрупкостью [8, 9]. Около 50 % металла идет в отходы, подвергаемые повторному переплаву. С целью оптимизации технологического процесса во Всероссийском институте авиационных материалов (РФ) предложен способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта, включающий плавку шихтовых материалов и заливку расплава в вакууме в предварительно нагретую литейную форму в виде керамической оболочки с литниково-питающей системой или форму из литейного графита с заливочной чашей, и последующую механическую обработку заготовки (рис. 1) [10].

В технологическом процессе используют двухкамерную индукционную печь с плавильно-за-

ливочной и загрузочной камерами, которые разделены вакуумным затвором, обеспечивающим вакуум на уровне 0,6 Па в плавильной камере. Форму перед заливкой разогревают до температуры 950...1000 °С. Заливку в литейную форму проводят при температуре расплава 1420...1600 °С со скоростью 20...50 кг/мин. Охлаждение отливки до температуры равной температуре плавления сплава осуществляют в вакууме, последующее — в воздушной среде. Необходимо отметить, что использование вакуумно-индукционной плавки при изготовлении заготовок имеет ряд существенных недостатков. Среди них: более низкая по сравнению с ЭЛП степень рафинирования жидкого металла; необходимость изготовления разовых оболочковых форм, а также литниково-питающих систем и заливочных чаш; необходимость подогрева и поддержания требуемой температуры керамической или графитовой оболочковой формы; взаимодействие расплавленного металла с материалом керамической или графитовой формы, приводящее к загрязнению отливки; сложность обеспечения и поддержания высокого перегрева расплава; сложность обеспечения высокой скорости заливки жидкого металла. Снижение скорости заливки приводит к образованию литейных дефектов типа «непропай», обусловленных высокой скоростью кристаллизации на стенках формы струи металла, окислением ее поверхности, что не позволяет получить надежную металлургическую связь между основной отливкой и закристаллизованной сосулькой первичного металла на внутренней поверхности литейной формы.

Эти недостатки не присущи процессу ЭЛП, который, как известно, является наиболее перспективным способом рафинирования и дегазации металла в вакууме [2, 5]. В связи с этим, в НПП «Элтехмаш» совместно с Институтом проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины освоено опытное производство трубчатых катодов для ионно-плазменного напыления покрытий из сплавов NiAlCrY. Немаловажную роль при разработке технологии изготовления таких катодов сыграла острая необходимость импортозамещения в Украине аналогичных изделий из РФ. Следует отметить, что стоимость единицы изделия, импортируемого в настоящее время из РФ, достигает 6000 дол. США, тогда как цена катода, изготовленного по разработанной технологии, не превышает 4500.

Выплавка трубчатых заготовок из сплавов МЗП6 и МЗП7 осуществляли в два этапа на элект-

тронно-лучевой установке L-4, разработанной и изготовленной в НПП «Элтехмаш» [11]. Установка оснащена четырьмя газоразрядными электронными пушками с холодным катодом мощностью 100 кВ каждая. На первом этапе согласно [9] готовили слитки сплавов МЗП6 и МЗП7 (таблица) в виде цилиндрических заготовок диаметром 100 мм и длиной 250...300 мм.

В рабочей камере установки L-4 монтировали тигельное устройство для выплавки трубчатых заготовок (рис. 2). Необходимое количество слитков заданного химического состава помещали в камеру горизонтального механизма подачи шихты в зону плавки. Перед началом процесса (2-й этап) водоохлаждаемый шток с затравкой перемещали в медный водоохлаждаемый цилиндрический кристаллизатор на высоту 10...15 мм от его верхней кромки. При этом шток фиксировали таким образом, чтобы между ним и кристаллизатором, а также медным водоохлаждаемым цилиндрическим дорном, расположенным соосно с кристаллизатором и закрепленным с помощью специальной траверсы, через которую осуществляется циркуляция воды, не было зазора. В противном случае возможен пролив жидкого металла, что делает невозможным дальнейшее проведение технологического процесса. Диаметр дорна в нижней части несколько меньше, чем в верхней, что исключает заклинивание и деформацию стенок дорна при изъятии его из литой заготовки. Это обеспечивает

Химический состав слитков МЗП6 и МЗП7 после ЭЛП				
Сплавы	Содержание элементов, мас. %			
	Cr	Al	Y	Ni
МЗП6	18...24	11...14	0,4...1,0	основа
МЗП7	—»—	4...6	—»—	—»—

получение цилиндрических металлических трубчатых отливок различного химического состава, так как при кристаллизации сплава, последующем охлаждении отливки и ее термической усадке исключается ее заклинивание и деформация стенок дорна. Заготовки никелевого сплава сплавляли в промежуточную емкость, а жидкий металл постепенно сливался через носик проемкости в кристаллизатор. Высота заливки составляла 9...11 мм. В связи с наличием траверсы, которая служит для крепления медного дорна и подвода к нему охлаждающей воды с целью исключения ее разрушения под действием электронного пучка, нагрев поверхности металла в кристаллизаторе осуществляли с помощью двух электронных пушек 1, 2 (рис. 1, б). Лучи пушек сканировали по заданной программе (частота сканирования 50 Гц, ток каждой пушки 0,8...1,0 А), формируя две зоны нагрева в форме соприкасающихся полуколец (рис. 2, б). При раздельном управлении мощностью электронно-лучевых нагревателей может возникать существенный градиент температур в зонах нагрева, что при определенных

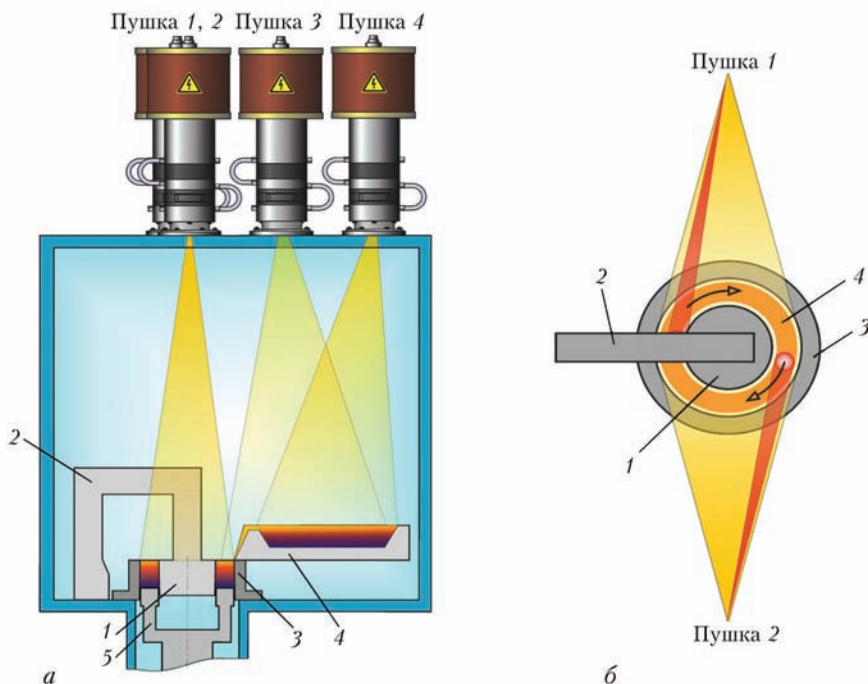


Рис. 2. Схемы конструкции кристаллизатора для получения трубчатой заготовки способом ЭЛП (а) и нагрева ванны расплава двумя электронными пушками с развертками лучей в форме полуколец (б, вид сверху): 1 — водоохлаждаемый дорн; 2 — траверса; 3 — водоохлаждаемый тигель; 4 — промежуточная емкость; 5 — водоохлаждаемый шток с затравкой

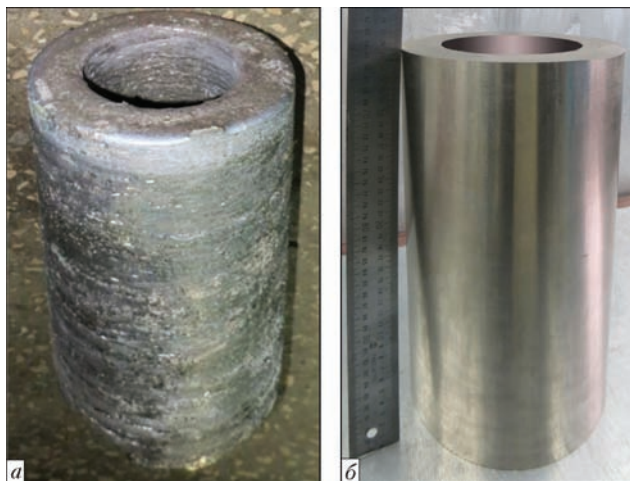


Рис. 3. Внешний вид трубчатой заготовки, полученной способом ЭЛП, после выплавки (а) и механической обработки (б)

условиях приводит к растрескиванию и заклиниванию отливки в кристаллизаторе. Поэтому в процессе формирования заготовки осуществлялось синхронное регулирование мощности пушек для поддержания в жидком состоянии поверхности материала в кристаллизаторе при примерно одинаковой температуре. После выдержки первой порции залитого металла в кристаллизаторе в течение 6...8 с заготовку вытягивали со скоростью 1 мм/с, одновременно с этим осуществляя заливку очередной порции металла и контролируя с помощью датчика ее высоту на уровне 9...11 мм. При этом недопустимым является полный выход закристаллизованной части отливки из кристаллизатора.

Таким образом, трубчатая заготовка с внешним и внутренним диаметрами ($D_{\text{внеш}} = 198$, $D_{\text{внутр}} = 114$) и длиной (L) 358...360 мм формировалась в течение 240...250 мин. Ее полностью вытягивали из кристаллизатора и охлаждали в вакууме до температуры 300 °С, после чего извлекали из рабочей камеры установки и охлаждали на открытом воздухе до температуры окружающей среды. Затем заготовку подвергали механической обработке до получения размеров, мм: $D_{\text{внеш}} = 180$, $D_{\text{внутр}} = 140$ и $L = 348$...352. Стружку после химической очист-

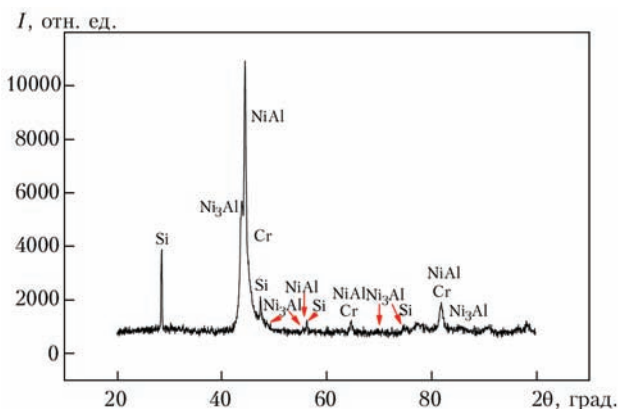


Рис. 4. Фазовый состав трубной заготовки из сплава МЗП6

ки, сушки и компактирования повторно использовали в качестве исходного материала для выплавки заготовок. Внешний вид заготовки после выплавки и механической обработки представлен на рис. 3.

Химический состав полученных заготовок полностью соответствует техническим условиям на катоды согласно ТУ У 27.4-200113410.002-2001 [9] и ТУ У 1-92-113-87 [12]. Визуальный осмотр и контроль геометрических размеров подтверждает соответствие катодов требованиям ТУ 6823-21-38 (АО «Мотор-Сич»).

Фазовый состав материала заготовок определяли на дифрактометре ДРОН-4 съемкой в $\text{Cu-}\alpha$ -фильтрованном излучении в диапазоне углов $2\theta = 20$... 100° с использованием кремния в качестве эталона. Запись дифрактограмм осуществляли при сканировании с шагом $0,05^\circ$. Согласно результатам анализа для литого материала сплава МЗП7 характерно образование твердого раствора на основе никеля. Более сложным является фазовый состав сплава МЗП6. Основными составляющими материала являются жаростойкие фазы β -(NiAl) и γ' -(Ni_3Al), а также α -твердый раствор на основе хрома (рис. 4).

Типичная микроструктура литых заготовок из сплавов МЗП7 и МЗП6 представлены на рис. 5.

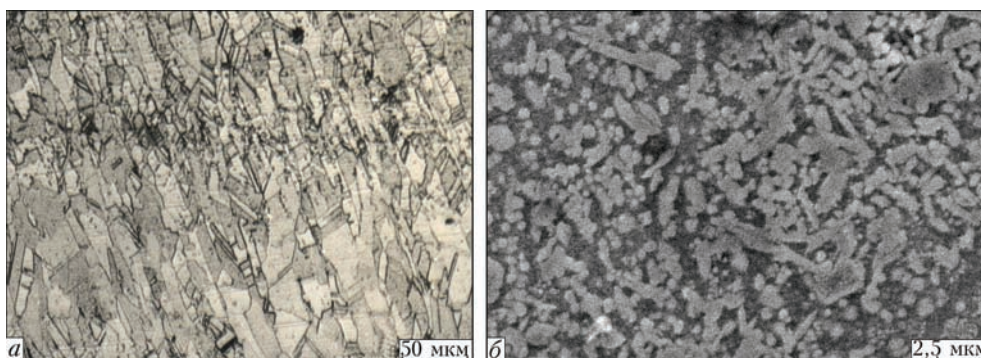


Рис. 5. Микроструктура литых заготовок из сплавов МЗП7 (а) и МЗП6 (б)

Порционная заливка и быстрая кристаллизация расплава приводят к образованию дисперсной структуры. При примерно одинаковом содержании Ni, Cr и Y в сплавах дисперсность элементов структуры возрастает при увеличении содержания алюминия с 4...6 (МЗП7) до 10...14 мас. % (МЗП6), что способствует образованию новых фаз. Следует отметить, что для сплава МЗП7 характерен плавный переход от мелкозернистой структуры в зонах, прилегающих к охлаждаемым поверхностям дорна и кристаллизатора, к крупнозернистой, формирующейся в центральных областях отливки. Для отливок сплава МЗП6 это явление менее выражено.

Проведены экспериментальные работы по оценке возможности применения опытных катодов в АО «Мотор-Сич». В сравнительных исследованиях по нанесению покрытий на поверхность лопаток использовали две отливки производства НПП «ЭЛТЕХМАШ» из сплава МЗП6 и один серийный образец аналогичного состава из сплава марки СДП2 (серийное производство, РФ). Нанесение покрытий проводили на установке АПН-250. Установка с опытным катодом работала стабильно, все параметры соответствовали серийной технологии. На лопатках с покрытием был выполнен контроль шероховатости, который показал, что она составляет $R_a = 1,63 \dots 2,88$ на пере лопатки, и $R_a = 0,67 \dots 3,2$ на проточных поверхностях полок.

Контроль лопаток с покрытием показал, что они соответствуют требованиям ТУ-222-ТУ-20 АО «Мотор-Сич». Проведенные исследования подтвердили, что структура и толщина опытных покрытий соответствует таковым, полученным с использованием серийных катодов.

Выводы

Разработана экспериментальная электронно-лучевая технология выплавки трубчатых катодов для ионно-плазменного нанесения покрытий.

Эксплуатационные характеристики покрытий на лопатках, полученных распылением опытных катодов, соответствуют характеристикам серийных.

Список литературы

1. ВИАМ РФ. <https://viam.ru/review/2725>
2. (2007) *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве*. Ладохин С. В. (ред.). Киев, Сталь.
3. Собко-Нестерук О. Е., Третьяк Н. Г., Чайка Н. В. и др. (2013) Производство горячепрессованных и холоднодеформированных труб из литой полой заготовки титанового сплава BT1-0, изготовленной способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **1**, 15–20.
4. Ахонин С. В., Березос В. А., Крыжановский В. А. и др. (2014) Получение трубных заготовок из титанового сплава BT14 способом ЭЛП. *Там же*, **3**, 21–25.
5. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. (1980) *Электронно-лучевая технология*. Москва, Энергия.
6. Симс Ч., Хагель В. (1976) *Жаропрочные сплавы*. Москва, Metallurgiya.
7. Елисеев Ю. С., Абраимов Н. В., Крымов В. В. (1999) *Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении*. Москва, Высшая школа.
8. (1985) *Прутки литые из сплавов СДП1 и СДП2 для жаростойких покрытий: ТУ 1-92-93–84*.
9. (2015) *Материалы в слитках и порошках для защитных покрытий*. Изменение 3 к ТУ У 27.4-20113410.002-001.
10. Фоломейкин Ю. И., Мобуяджан С. А., Каблов Е. Н. и др. (2009) *Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта*. РФ, Пат. 2344019.
11. Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Мельник А. Г. и др. (2016) Промышленная электронно-лучевая установка L-4 для переплава и рафинирования в вакууме металлов и сплавов. *Порошковая металлургия*, **7–8**, 138–147.
12. (1987) *Катоды литые трубные: ТУ 1-92-113–87*.

References

1. VIAM RF. <https://viam.ru/review/2725>
2. (2007) *Electron beam melting in foundry*. Ed. by S.V. Ladokhin. Kiev, Stal [in Russian].
3. Sobko-Nesteruk, O.E., Tretyak, N.G., Chaika, N.V. et al. (2013) Manufacture of hot-pressed and cold-deformed pipes of VT1-0 titanium alloy cast hollow billet, produced by electron beam melting method. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 15–20 [in Russian].
4. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Kryzhanovskii, V.A. et al. (2014) Production of tubular billets from VT14 titanium alloy by EBM process. *Ibid.*, **3**, 21–25 [in Russian].
5. Shiller, Z., Gajzig, U., Pantser, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
6. Sims, Ch., Hagel, V. (1976) *High-temperature alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Eliseev, Yu.S., Abraimov, N.V., Krymov, V.V. (1999) *Chemical heat treatment and protective coatings in aircraft engine building*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
8. (1985) *Cast rods from SDP1 and SDP2 alloys for heat-resistant coatings: TU 1-92-93–84* [in Russian].
9. (2015) *Materials in ingots and powders for protective coatings*. Version 3 to TU U 27.4-20113410.002-001 [in Russian].
10. Folomejkin, Yu.I., Mobuyadjan, S.A., Kablov, E.N. et al. (2009) *Method of manufacture of cast tubular products of nickel- and/or cobalt-based alloys*. RF, Pat. 2344019 [in Russian].
11. Grechanyuk, N.I., Kucherenko, P.P., Melnik, A.G. et al. (2016) Commercial electron beam installation L-4 for vacuum remelting and refining of metals and alloys. *Poroshk. Metallurgiya*, **7–8**, 138–147 [in Russian].
12. (1987) *Cast tube cathodes: TU 1-92-113–87* [in Russian].

**ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ВИПЛАВКА ТРУБЧАТИХ ЗАГОТОВОК ЗІ СПЛАВІВ NiCrAlY
ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЯКОСТІ КАТОДІВ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ**

М. І. Гречанюк¹, Ю. А. Смахнюк², О. В. Хоменко¹, В. В. Клочихин³, І. М. Гречанюк²

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²НВП «ЭЛТЕХМАШ».

21011, м. Вінниця, вул. Ватутіна, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

³АТ «Мотор-Січ».

69068, м. Запоріжжя, просп. Машинобудівників, 15. E-mail: tb.ugmet@motorcich.com

Розроблено експериментальну електронно-променеву технологію отримання трубчатих заготовок зі сплавів NiCrAlY, що використовуються в якості катодів при нанесенні жаростійких покриттів іонно-плазмовим методом. Встановлено, що покриття, які нанесено на лопатки газових турбін авіаційних двигунів з використанням катодів електронно-променевої виплавки, відповідають вимогам ТУ АТ «Мотор-Січ» на даний вид виробів. Бібліогр. 12, табл. 1, іл. 5.

Ключові слова: електронно-променева плавка; жаростійкі сплави; покриття; лопатки газових турбін; іонно-плазмове нанесення

**ELECTRON BEAM MELTING OF TUBULAR BILLETS FROM NiCrAlY ALLOYS USED AS CATHODES
FOR ION-PLASMA COATINGS**

N.I. Grechanyuk¹, Yu.A. Smashnyuk², E.V. Khomenko¹, V.V. Klochikhin³, I.N. Grechanyuk²

¹I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanovskoho Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²NPP «Eltekh mash».

25 Vatutina Str., 21011, Vinnitsa, Ukraine. E-mail: vin25ebt@ukr.net

³Motor Sich JSC.

15 Motorostroiteley Ave., 69068, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

An experimental electron beam technology was developed to produce tubular billets from NiCrAlY alloys used as cathodes when applying heat-resistant coatings using the ion-plasma method. It was established that the coatings applied to the blades of gas turbines of aircraft engines using cathodes of electron beam melting meet the requirements of TS of «Motor-Sich» JSC for this type of products. Ref. 12, Tabl. 1, Fig. 5.

Key words: electron beam melting; heat resistant alloys; coatings; gas turbine blades; ion plasma deposition

Поступила 21.12.2017

ИНТЕРПАЙП ВОЗОБНОВИЛ ПОСТАВКИ СВАРНЫХ ТРУБ В США



<https://www.azovpromstal.com>

Украинская промышленная компания ИНТЕРПАЙП — производитель бесшовных труб и ж/д колес в 2018 г. возобновила поставки сварных труб на американский рынок после длительного перерыва.

Портфель заказов на данный сортament трубной продукции на 2018–2019 гг. составляет около 10 тыс. т.

Специалистам дочерней компании «North American Interpipe» удалось восстановить отношения с крупными дистрибьюторами по поставкам сварных труб. Ранее они приобретали только линейные бесшовные трубы. Возвращение сварных труб ИНТЕРПАЙП на американский рынок позволит компании иметь более диверсифицированный продуктовый портфель и удовлетворять более широкий спектр запросов покупателей.

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВА СПОСОБОМ ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА

А. В. Овчинников¹, С. М. Теслевич², Д. Л. Тизенберг², В. С. Ефанов¹

¹Запорожский национальный технический университет.

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 62. E-mail: kafedra_mex@zntu.edu.ua

²ООО «СП УТ Экология».

69008, г. Запорожье, ул. Зейская, 5. E-mail: teslevich.sergey@ukr.net

Рассмотрена возможность получения сплава на основе кобальта с использованием разнофракционного состава шихтового материала. Установлены коэффициенты перехода элементов шихты и исследована микроструктура полученного кобальтового сплава. Обеспечено качественное распределение легирующих элементов по всей структуре слитка. Библиогр. 4, табл. 5, ил. 5.

Ключевые слова: плавка; кобальтовый сплав; шихта; слиток; легирующий элемент

Кобальтовые сплавы используют для получения покрытий в технологиях поверхностного упрочнения и восстановления деталей машин, работающих в условиях воздействия агрессивных сред, абразивов и высоких температур. В ряде случаев на готовые изделия наносят покрытие из кобальтового сплава, повышая тем самым их ресурс работы [1].

Как известно, свойства твердых сплавов в значительной мере зависят от технологии их изготовления. Во-первых, наиболее распространенным вариантом производства твердых сплавов является традиционная технологическая схема, включающая операции подготовки исходных материалов и шихты, формование заготовок из твердосплавной шихты и дальнейшего спекания. Во-вторых, качество спекания большинства твердых сплавов зависит от дисперсности и качества подготовленных компонентов порошков, что требует больших экономических затрат. Еще одной проблемой является сложность получения однородной структуры этих сплавов [2, 3]. Поэтому целесообразно рассмотреть другие технологии и способы их изготовления.

Цель данной работы — разработка технологии получения кобальтового сплава типа МЗП-1 способом дугового переплава из разнофракционной шихты, позволяющей получать однородные слитки.

Актуальность работы. Необходимость изготовления сплавов на основе кобальта требует сбалансированного подбора состава и количества химических элементов в зависимости от их свойств.

Введение алюминия в кобальтовые сплавы повышает их вязкость и снижает микротвердость (не

более 20 HRC), вследствие чего сплав имеет относительно низкую износостойкость, например, при абразивном износе. Однако практика работы современных деталей машин в условиях абразивного износа, а также изготовление металлических деталей из высокопрочных сталей и сплавов дает основание утверждать, что микротвердость должна быть не менее 50 HRC. Исследование микроструктуры известных сплавов показывает, что причиной низкой микротвердости является отсутствие укрепляющих армирующих компонентов. Например, соединения редкоземельных элементов, прежде всего иттрия, который активно образует в сплаве из-за наибольшего сродства к азоту, водороду и кислороду соответствующие нитриды, гидриды и оксиды в виде наноразмерных включений, повышающих микротвердость и другие свойства материала.

Таким образом, получение необходимых характеристик зависит от состава и структуры слитка. Это, в свою очередь, обеспечивает сложные многокомпонентные системы легирования, а также комплексы модифицированных элементов сплава. Эффективность их действия зависит от равномерности распределения в слитках, что формирует необходимые структурные составляющие катодов и в конечном итоге — покрытий. Одним из определяющих факторов равномерного распределения легирующих и модифицирующих элементов есть их начальное состояние в материалах шихты и способы выплавки. Наиболее распространенными считаются электронно-лучевой (ЭЛП) и дуговой переплавы (ДП).

К преимуществам процесса дугового переплава можно отнести возможность ведения плавки

Таблица 1. Химический состав сплава типа МЗП-1, мас. %

Co	Ni	Cr	Al	Y	Примеси
Основа	0...2,0	20...25	10...13	0,4...1,5	≤1,5

с использованием плавящихся и неплавящихся электродов, используя разные технологические приемы, а также: за одну плавку получать слитки от нескольких грамм до тонн; получать однородные слитки за одну плавку с использованием индукционного переплава и управлением электродугой; вести процесс как в вакууме, так и в среде инертных газов; использовать разнотипную шихту в широком диапазоне исходных размеров, даже порошки [4].

Материалы, методика экспериментов и анализ полученных результатов. Разработка сплава на основе кобальта предусматривала получение предварительно заданного химического состава (табл. 1). Для изготовления слитков при плавке можно использовать сырье в виде порошков или чушек. Согласно анализу химического состава для выплавки опытного сплава использовали следующие материалы: алюминий первичный (99,9 %) ГОСТ 11069–2001; иттрий металлический (99,5 %) ТУ 48-4-208–72; кобальт (К1АУ) ГОСТ 123–98; никель катодный Н1У ГОСТ 849–97; хром металлический Х99Н2 ГОСТ 5905–2004.

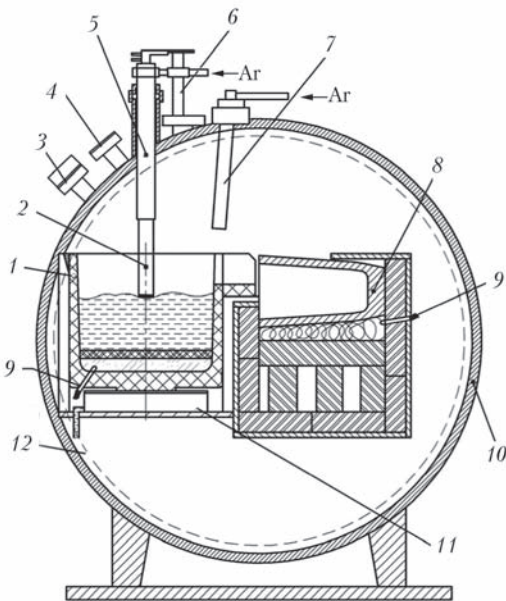


Рис. 1. Схема установки УПДА: 1 — тигель; 2 — неплавящийся электрод; 3 — смотровое окно с видеорегистрированием; 4 — смотровое окно; 5 — плазмотрон; 6 — привод перемещения; 7 — подведение аргона; 8 — кокиль; 9 — термомпара; 10 — плавильная камера; 11 — анод; 12 — поворотное устройство

Таблица 2. Химический состав и количество легирующих элементов в сплаве типа МЗП-1, мас. %/г

Co	Ni	Cr	Al	Y	Всего
64,3/128,6	0,2/0,4	23/46	12/24	0,5/1	100/200

Выплавку опытного сплава выполняли на дуговой установке УПДА в графитовом кристаллизаторе (рис. 1).

Перед началом работ предоставленные материалы предварительно измельчали, перемешивали и шихтовали. Шихту готовили с учетом теоретического коэффициента перехода элементов опытного состава.

Отработку режимов переплава проводили путем экспериментальной реализации процесса. Диапазон режимов следующий: $I = 450...1200\text{ А}$, $U = 30...70\text{ В}$, $t = 20...35\text{ мин.}$, перемешивание 3...5 раз, вакуум $10^{-4}...10^{-5}\text{ мм. рт. ст.}$, среда газа — Ag/He (70/30), давление 0,05 МПа.

Расчет шихты проводили с учетом веса слитка равного 200 г (табл. 2).

Технологические режимы оборудования для выплавки слитков включали работу диффузионного паромасляного насоса Н5/20 и форвакуумного насоса ВН-2 МГ, которую контролировали вакуумметром (время работы составляло 5,5 ч в сутки) и дуговой печи УПДА (30 мин в сутки).

В результате получены слитки в виде «шайб» диаметром около 85 мм и толщиной 10 мм (рис. 2).

Для оценки химического состава проводили исследование в двух зонах фрагмента слитка (рис. 3).

К первой зоне отнесли торцевую плоскость слитка, ко второй — поверхности слитка, полученные при разрезании. Исследования проводили в центре этих зон с применением многоцелевого

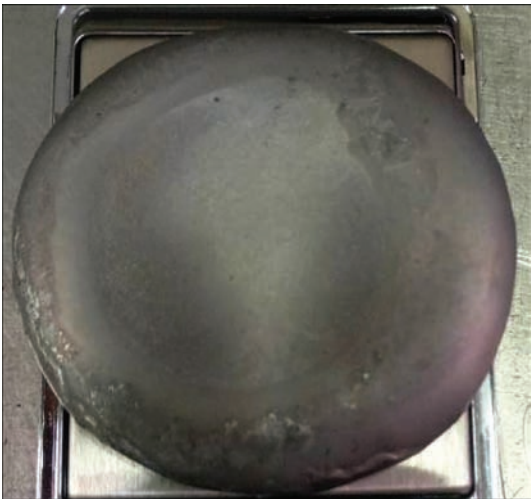


Рис. 2. Вид опытного слитка

Таблица 3. Химический состав образцов пяти плавок, определенных спектральным методом, мас. %

Элемент	Зона 1	Зона 2
Co	65,14±0,20	65,27±0,19
Cr	22,50±0,11	22,26±0,10
Al	10,53±0,25	10,12±0,23
Ni	0,19±0,04	0,21±0,04
Y	0,46±0,01	0,49±0,01
S	0,17±0,01	0,19±0,01
Fe	0,14±0,02	0,15±0,02
Si	0,87±0,05	1,31±0,06

Таблица 4. Коэффициенты перехода элементов шихты

Элемент	Ni	Cr	Al	Y
Угар, %	< 1	2,7	13,92	4,0
Коэффициент перехода элемента	0,99	0,93	0,86	0,96

Таблица 5. Химический состав опытного сплава (контрольная плавка), мас. %

Основа	Легирующие элементы					Примеси	
Co	Cr	Al	Ni	Y	Si	Fe	
64,77 ± 0,21	22,91 ± 0,11	10,51 ± 0,25	0,21 ± 0,04	0,59 ± 0,01	0,95 ± 0,05	0,06 ± 0,02	

растрового электронного микроскопа РЭМ 106I, оснащенного системой микроанализа.

Содержание иттрия определяли энергодисперсионным рентгено-спектральным методом.

Металлографические исследования полученной структуры слитка проводили с помощью оптического и электронных микроскопов. Образцы для металлографических исследований изготавливали последовательным шлифованием и полированием. Травление шлифов осуществляли в реактиве следующего состава: HF — 10 мл, HNO₃ — 25 мл, глицерин — 65 мл. Микроструктурный анализ проводили с применением инвертированного ми-

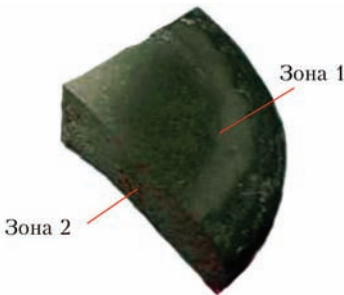


Рис. 3. Образец опытного сплава первой выплавки кроскопа «Neophot-32». В табл. 3 приведен химический состав образцов опытных плавок.

Металлографическими исследованиями установлено, что в структуре сплавов нет структурной неоднородности. Присутствует зона с измененной структурой, что является следствием значительно-го уменьшения скорости кристаллизации сплава в результате подогревания кристаллизатора. Таким образом, отмеченная зона является следствием технологической неточности при плавке.

Сравнение данных табл. 2 и 3 позволило установить, что химический состав слитка не отвечал требованиям поставленной задачи, поэтому было выполнено уточнение коэффициентов перехода и корректировка состава шихты.

Для установления коэффициентов перехода компонентов шихты при выплавке слитков проводили сравнение химического состава, который регламентировали при расчете шихты и химического состава, фактически полученного по средним значениями табл. 3. Сравнение данных табл. 2 и 3 позволяет рассчитать коэффициенты перехода элементов лигатуры. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таким образом, из анализа данных табл. 4 следует, что для обеспечения необходимой концентрации химических элементов в составе сплава необходимо корректировать состав шихты с учетом коэффициентов перехода.

Для окончательного вывода о соответствии опытного сплава необходимым требованиям про-

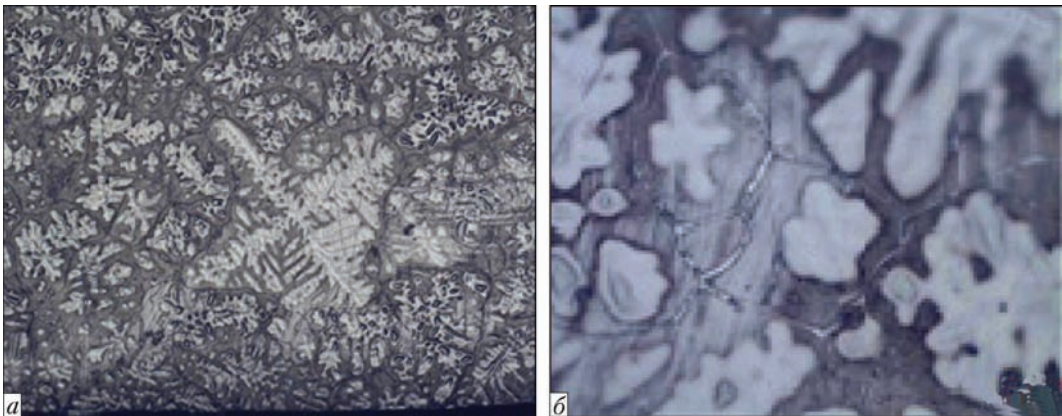


Рис. 4. Микроструктура сплава, полученная с различным увеличением: а — ×100; б — ×500; РЭМ

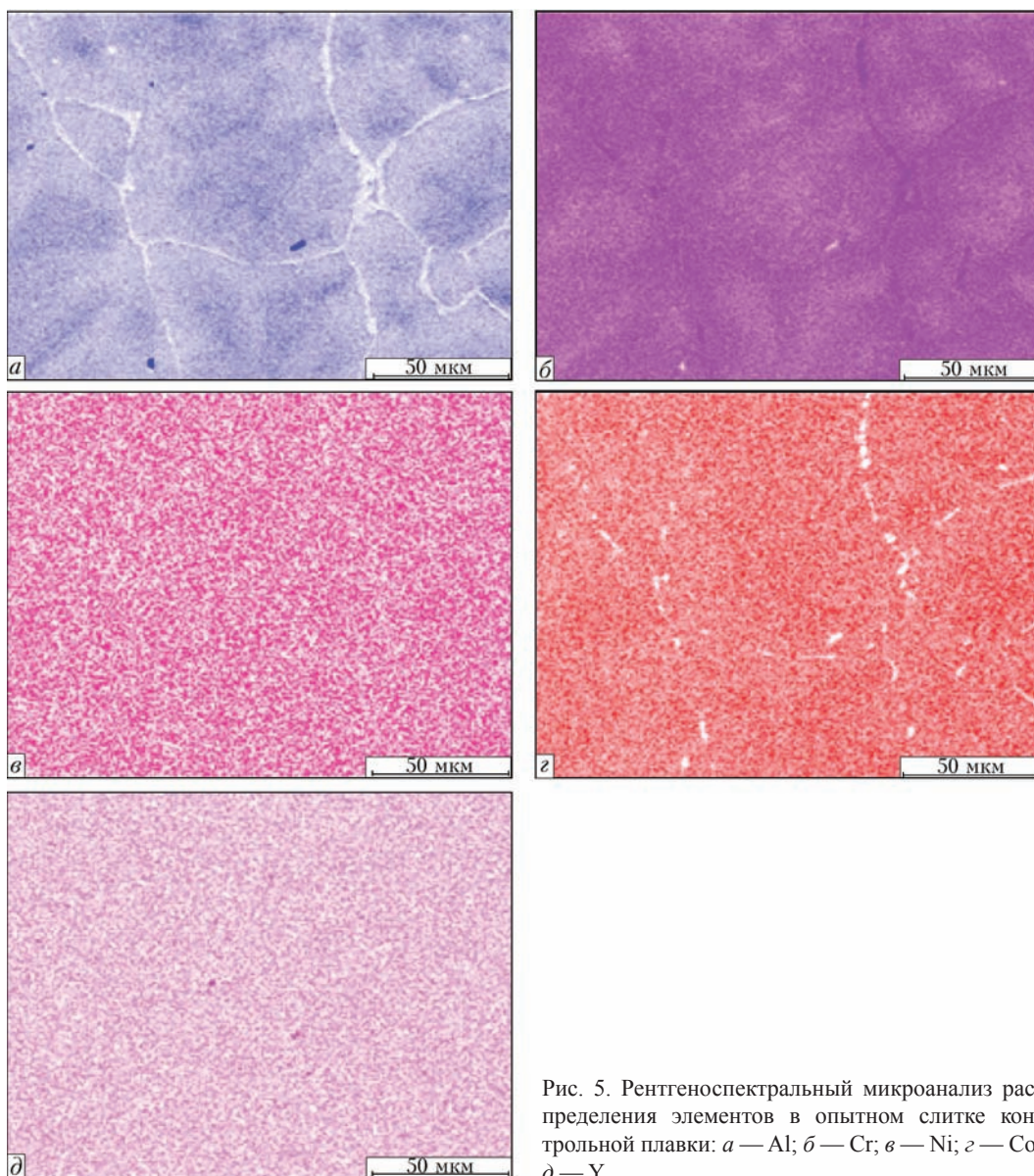


Рис. 5. Рентгеноспектральный микроанализ распределения элементов в опытном слитке контрольной плавки: *а* — Al; *б* — Cr; *в* — Ni; *г* — Co; *д* — Y

вели контрольную плавку с учетом рациональных режимов и коэффициентов перехода, которые определены экспериментально.

В результате, химический состав полученного слитка отвечал требованиям задания (табл. 5).

Анализ результатов металлографических исследований позволил установить, что структура полученного сплава является мелкодисперсной. Структурных неоднородностей не обнаружено (рис. 4, 5).

Распределение химических элементов в опытном кобальтовом сплаве равномерное. В ходе исследований получены карты распределения алюминия, хрома, кобальта, иттрия и никеля. Большая интенсивность цвета на картах соответствует большему содержанию элемента в данной области.

Как видно из рис. 5 в исследуемой площади образца отсутствуют скопления с большой интенсивностью цветов, т. е. можно сделать вывод, что на всех картах отсутствует структурная неоднород-

ность по исследуемым элементам. Однако для хрома характерно большее выделение на границах зерен.

Иттрий имеет низкие показатели растворимости в опытных сплавах, что может привести к выявлению большого количества включений. Итог результатов микроанализа по иттрию позволил установить отсутствие неоднородности на исследуемой площади. Таким образом, полученные слитки опытного состава по концентрации химических элементов отвечают требованиям поставленного задания и являются гомогенными, что подтверждает эффективность способа их получения.

Выводы

1. Проведен анализ способов получения катодов из сплавов на основе кобальта.
2. Показано, что использование дугового переплава позволяет расширить применение шихтовых материалов разной фракции.

3. Проведены экспериментальные плавки подготовленной шихты на кобальтовой основе из разнофракционного сырья с применением дуговой печи УПДА.

4. Установлены коэффициенты перехода элементов шихты. Оценка перехода элементов сплава позволила установить коэффициенты перехода для: Ni (0,99), Cr (0,93), Al (0,86) и Y (0,96).

5. Определено распределение компонентов в образцах. Установлено соответствие химического состава требованиям, заданным для разработки сплава. Проведены металлографические исследования и количественная оценка структур на РЭМ. Установлено, что сплавы имеют мелкодисперсную структуру с равномерным распределением элементов, т. е. являются гомогенными, и это говорит о качестве полученных образцов.

6. Выполнены контрольные плавки, которые подтвердили повторяемость процесса получения качественных слитков заданного химического состава на кобальтовой основе. В настоящее время дуговой переплав широко используется в мире, но в Украине для активных металлов и их сплавов практически не реализуется, поэтому его развитие является перспективным.

Список литературы

1. Симс Ч. Т. (1995) *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок*. Москва, Металлургия.
2. Масленков С. Б. (1983) *Справочник жаропрочных сталей и сплавов*. Москва, Металлургия.
3. Дмитриева Г. П., Черепова Т. С., Косорукова Т. А. и др. (2015) Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия. *Металлофизика и новейшие технологии*, 37, 7, 973–986.
4. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. (2008) *Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов*. Киев, Наукова думка.

References

1. Sims, Ch.T. (1995) *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power plants*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Maslennikov, S.B. (1983) *Reference book of high-temperature steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Dmitrieva, G.P., Cherepova, T.S., Kosorukova, T.A. et al. (2015) *Structure and properties of wear-resistant alloy based on cobalt and niobium carbide*. *Metallfizika i Novejshie Tekhnologii*, 37(7), 973–986 [in Russian].
4. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and high-reactive metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВУ СПОСОБОМ ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

О. В. Овчинников¹, С. М. Теслевич², Д. Л. Тизенберг², В. С. Єфанов¹

¹Запорізький національний технічний університет.

69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 62. E-mail: kafedra_mex@zntu.edu.ua

²ООО «СП УТ Екологія».

69008, м. Запоріжжя, вул. Зейська, 5. E-mail: teslevich.sergey@ukr.net

Розглянуто можливість отримання сплаву на основі кобальту з використанням різнофракційного складу шихтового матеріалу. Встановлені коефіцієнти переходу елементів шихти та досліджено мікроструктуру кобальтового сплаву. Опрацьовано якість розподілення легуючих елементів по всій структурі зливка. Біблогр. 4, табл. 5, іл. 5.

Ключові слова: плавка; кобальтовий сплав; шихта; зливки; легуючий елемент

TECHNOLOGY OF MELTING INGOTS OF COBALT ALLOY BY THE ARC REMELTING METHOD

A. V. Ovchinnikov¹, S. M. Teslevich², D. L. Tizenberg², V. S. Efanov¹

¹Zaporozhye National Technical University.

62 Zhukovsky Str., 69063. E-mail: kafedra_mex@zntu.edu.ua

²LLC «SP UT Ecology».

Zaporozhye, Zeiskaya Str. 5, 69008. E-mail: teslevich.sergey@ukr.net

The feasibility of producing alloy on cobalt base with applying the different-fraction composition of charge material was considered. The coefficients of transition of charge elements were found and microstructure of produced cobalt alloy was examined. The qualitative distribution of alloying elements in all the ingot structure was provided. Ref. 4, Tabl. 5, Fig. 5.

Key words: melting; cobalt alloy; charge; ingot; alloying element

Поступила 29.05.2018

ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА В СЕКЦИОННОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Б. Е. Патон, Г. М. Григоренко, И. В. Шейко

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

Приведены научные и практические аспекты прогрессивного процесса, основанного на индукционном нагреве и плавлении металлов с формированием слитка в секционном охлаждаемом кристаллизаторе. Описаны особенности плавления и кристаллизации металла в секционном кристаллизаторе. Приведены технические характеристики установок (печей), разработанных в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Представлены данные о качестве получаемого металла и дана оценка перспективных областей применения описанного процесса. Библиогр. 5, табл. 3, ил. 10.

Ключевые слова: индукционный нагрев; электромагнитное поле; индуктор; слиток; металлическая ванна; кристаллизация; быстроокаленные чешуйки; структура

Высокочастотное электромагнитное поле, создаваемое электрическим током, протекающим в индукторе, является наиболее стерильным источником тепловой энергии. Индукционный нагрев применительно к плавке металлов имеет следующие положительные качества [1–3]:

высокую стерильность индукционного источника нагрева, которая обусловлена тем, что тепло при нагреве выделяется непосредственно в нагреваемом теле. При этом электромагнитная волна, как источник тепловой энергии, не несет в себе компоненты негативно влияющие на нагреваемый материал;

интенсивное перемешивание жидкого металла в объеме ванны, обеспечивающее выравнивание температуры и химического состава в расплаве;

отсутствие локального перегрева металла, который обеспечивает низкий угар легирующих элементов в сплавах;

индукционный источник нагрева, не требующий создания каких-либо специальных условий для его работы, и поэтому вести плавку можно в вакууме или газовой среде заданного состава и давления;

отсутствие жесткой связи между подводимой мощностью и скоростью плавки. В данном случае подразумевается, что переплавляемая шихта напрямую не связана с подводом мощности в зону плавления, как это имеет место при ВДП или каноническом ЭШП;

индукционный источник нагрева позволяет выдерживать металлический расплав в жидком состоянии неограниченное время;

простоту регулирования и поддержания температуры расплава в заданном диапазоне. Преобразователи частоты тока позволяют сравнительно просто регулировать мощность, подводимую к индуктору;

технологическое оборудование, используемое в процессах индукционного нагрева или плавки, отличается высокой степенью надежности в работе и хорошо адаптируется в системы автоматизации;

индукционный нагрев или плавка металлов может сравнительно легко дополняться другими источниками электронагрева с целью интенсификации процесса, что подтверждает практика работы многих индукционных тигельных печей, дополнительно оснащенных дугowymi плазмотронами.

Благодаря отмеченным свойствам, индукционный нагрев нашел широкое применение в различных отраслях промышленности, например, для термообработки, сварки и плавки металлов.

В существующих плавильных агрегатах с тиглем из огнеупорного материала, отмеченные достоинства индукционного источника нагрева реализуются не в полной мере, поскольку во время плавки жидкий металл контактирует с огнеупорной стенкой тигля и загрязняется продуктами взаимодействия (неметаллическими и газовыми примесями). Из-за этого в индукционных тигельных печах невозможен переплав металлов, обладающих повышенной реакционной способностью (РЗМ, титан и др.) [4].

Задача устранения контакта жидкого металла с огнеупорным материалом во время плавки решается в плавильных агрегатах с секционным охлаждаемым кристаллизатором (процесс ИПСК)

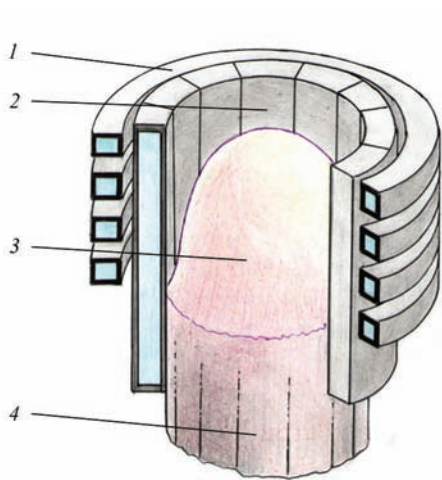


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ИПСК: 1 — индуктор; 2 — секционный кристаллизатор; 3 — металлическая ванна; 4 — слиток

или охлаждаемым секционным тиглем (процесс ИПХТ) [4, 5]. В этих плавильных агрегатах стенка тигля (кристаллизатора) «прозрачна» для электромагнитного поля и не взаимодействует с жидким металлом (рис. 1).

Исследования процессов ИПХТ и ИПСК показали, что механизм передачи энергии электромагнитного поля к металлической ванне отличается от обычной индукционной плавки, поскольку между индуктором и ванной жидкого металла находится охлаждаемая стенка холодного тигля или кристаллизатора, которая искажает электромагнитное поле в плавильной зоне и, по сути, выполняет роль индуктора (рис. 2).

По совокупности технологических приемов, которые реализуются в плавильных агрегатах, и конечному продукту, получаемому в них, индукционные установки с секционным кристаллизатором (тиглем) можно разделить на два типа, которые предназначены для: выплавки сплавов заданно-

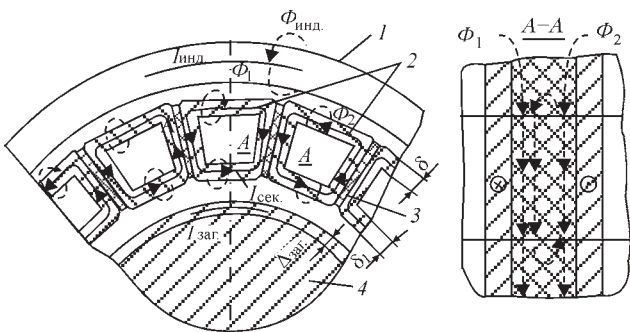


Рис. 2. Схема протекания токов в элементах системы индуктор–кристаллизатор–ванна жидкого металла ($I_{\text{инд}}$, $I_{\text{сек}}$ и $I_{\text{заг}}$) и вероятная картина магнитных полей в этой системе: 1 — индуктор; 2 — секции кристаллизатора; 3 — диэлектрическая прокладка; 4 — ванна жидкого металла

го состава с последующей разливкой в литейные формы или изложницы (процесс ИПХТ); выплавки и формирования слитка непосредственно в секционном кристаллизаторе (процесс ИПСК).

Установки второго типа (выплавка слитков) реализуются по двум схемам, в которых в процессе плавки слиток вытягивают из кристаллизатора или наплавляют в, так называемый, глуходонный кристаллизатор.

В ИЭС им. Е. О. Патона созданы плавильные агрегаты с секционным кристаллизатором различного типа (табл. 1).

Установки с вытягиванием слитка в процессе плавки предназначены для выплавки слитков из отходов гранулированных жаропрочных сплавов на никелевой основе (ОП-139) и титана (ОП-144).

Установка с наплавлением слитка в глуходонном секционном кристаллизаторе диаметром 225 мм (ОП-117) введена в опытно-промышленную эксплуатацию на ПО «Киевтрактородеталь» им. И. Лепсе. В условиях машиностроительного предприятия появилась возможность утилизи-

Т а б л и ц а 1. Основные технические характеристики установок ИПСК, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона					
Технический параметр	ОП-139*	ОП-144*	ОП-117**	ОП-151**	ОП-146***
Диаметр кристаллизатора, мм	80; 120; 150	60; 80; 100	225	125; 150	250; 300; 400
Высота кристаллизатора, мм	120...200	120...161	800	1000	1000...1200
Количество секций, шт.	12...16	12...16	24	12...16	24...40
Максимальная длина слитка, мм	800	800	600	800	до 2000
Мощность преобразователя тока, кВт	250	160	500	250	до 1000
Частота рабочего тока, кГц	8...10	66	2,5	8...10	2,5
Среда в плавильной камере во время плавки	аргон	аргон	аргон	аргон	аргон
Расход воды на охлаждение, м³/ч	8...12	8...10	12...16	10...12	до 50
Производительность, кг/ч, т/год	до 80	до 50	—	—	—
	—	—	50	40	500
Габаритные размеры, мм					
длина	6580	—	1940	3330	8300
ширина	5180	—	1650	2320	6000
высота	4675	—	3560	3945	9700

*Установка с вытягиванием слитка; **с наплавлением; ***гибридная.



Рис. 3. Внешний вид слитка ИПСК из титанового сплава ОТ4-2 диаметром 225 мм

ровать собственные титановые отходы (сплав ОТ4-2), которые годами накапливались, и возвращать их в технологический процесс.

Поверхность выплавленных слитков ИПСК имеет характерные особенности — наличие продольных тонких ребер высотой 0,5...1,0 мм, которые образуются в результате заполнения жидким металлом стыков между секциями кристаллизатора (рис. 3).

При соблюдении технологического режима выплавки усадочная раковина в слитках отсутствует (рис. 4).

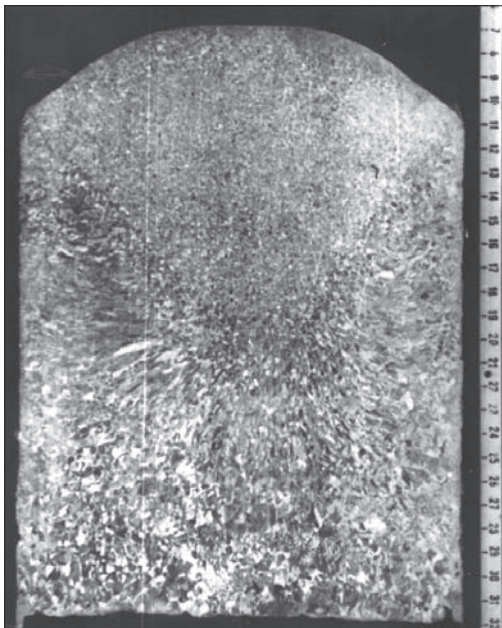


Рис. 4. Макроструктура слитка ИПСК из титанового сплава

Химический состав металла слитков соответствует требованиям ГОСТа для сплава ОТ4-2, а по содержанию регламентируемых примесей не превышает требований ТУ для вторичных сплавов (табл. 2).

Еще в середине 90-х годов прошлого века установка и технология по утилизации промышленных отходов платины были внедрены на Харьковском государственном научно-производственном предприятии «Рубин». Впервые в Украине в промышленных масштабах освоена выплавка слитков ИПСК массой 14...18 кг из отходов платины и ее сплавов, которые были сертифицированы в Гохране Украины. В 2000 г. эти работы были номинированы на Государственную премию в области науки и техники Украины.

На основании результатов совместных исследований ИЭС им. Е. О. Патона, Государственного института редких металлов (г. Москва) и Ленинадского комбината редких металлов (Таджикистан) разработана промышленная технология рафинирования ванадийсодержащей лигатуры АВТУ (Al–V–Ti–C) и создана опытно-промыш-

Таблица 2. Химический состав слитков сплава ОТ4-2, полученных способом ИПСК, %						
Вид шихты	Легирующие элементы		Газовые примеси			Твердость, НВ
	Al	Mn	[O]	[N]	[H]	
Отходы:						
не очищенные	3,67	1,18	0,22...0,32	0,50...0,62	0,012...0,017	360...385
после дробеструйной очистки	-»-	-»-	0,218...0,242	0,034...0,044	0,010...0,012	265...275
поверхности						
после дробеструйной очистки и промывки	-»-	-»-	0,183...0,2	0,029...0,041	0,007...0,012	228...277
Регламент по ТУ	2,5...4,0	0,50...2,00	≤ 0,30	≤ 0,60	≤ 0,015	≤ 0,300

ленная установка ОП-151 (рис. 5) для рафинирования черновых редкоземельных металлов. Производительность установки при индукционном рафинирующем переплаве черного иттрия в 3...4 раза выше, чем при принятом основным в редкометаллической подотрасли процессе дугового рафинирования в среде аргона.

Лигатуру АВТУ с содержанием ванадия до 55 % получали алюмотермическим способом. Слитки лигатуры имели высокую загрязненность металла по неметаллическим включениям, что обусловлено спецификой этого процесса — незначительным перегревом металла и различными температурными условиями кристаллизации зон слитков (рис. 6)

Однократный переплав отходов лигатуры позволяет получать металл, который по качеству соответствует требованиям ТУ.

Установка ОП-146 предназначена для индукционной выплавки расходных электродов из губчатого титана минуя стадию прессования. В этом случае исключается, во-первых, сама операция прессования и, во-вторых, отпадает необходимость введения в шихту алюминия в качестве связующего компонента. В ряде случаев содержание алюминия достаточно жестко регламентировано в титановых сплавах и поэтому введение его как технологического компонента нежелательно.

Особенностью конструкции и работы этой установки является то, что состав и компоновка

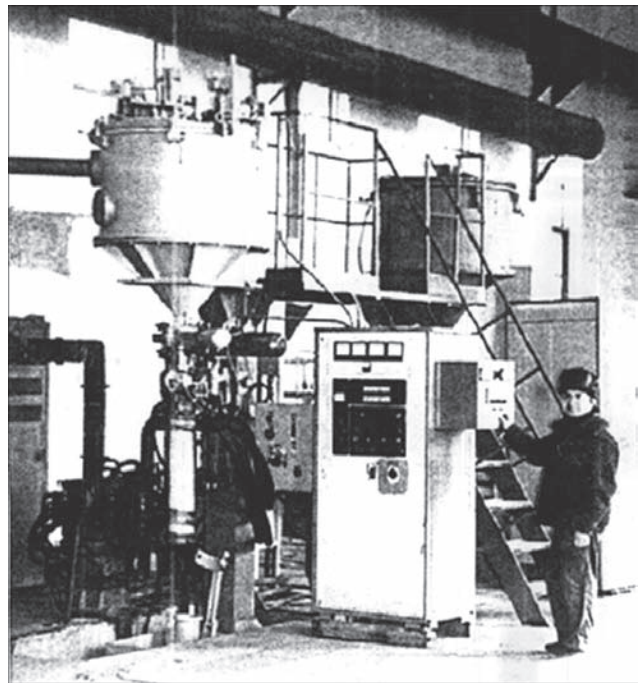


Рис. 5. Опытно-промышленная установка ОП-151

узлов и агрегатов позволяет выплавлять слитки по различным технологическим вариантам:

периодически или непрерывно вытягивать слиток в процессе плавки;

наплавлять слиток без его перемещения относительно кристаллизатора (длина слитка приблизительно 1000 мм);

наплавлять слиток, совмещая его наплавление без перемещения относительно кристаллизатора с последующим вытягиванием. Вначале слиток на-

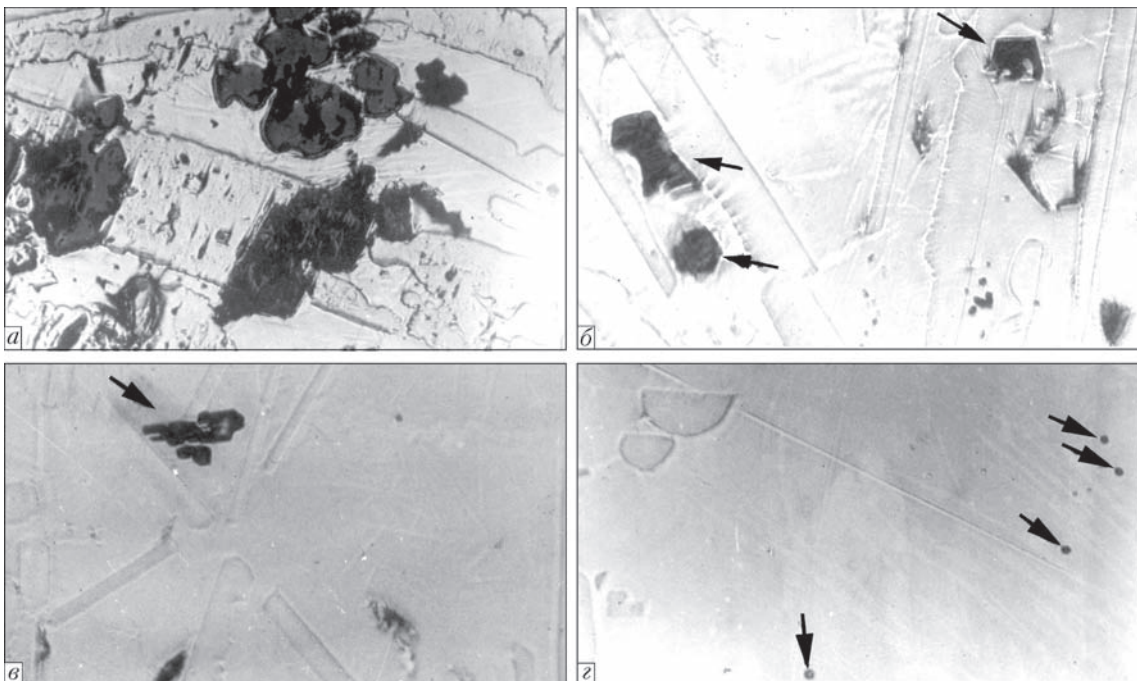


Рис. 6. Неметаллические включения в слитках лигатуры АВТУ: а — некондиционный металл; б — кондиционный металл и выплавленный по технологии ИПСК из отходов лигатуры; в — в проточной атмосфере аргона; з — в аргоне с флюсом CaF_2 ($\times 600$)

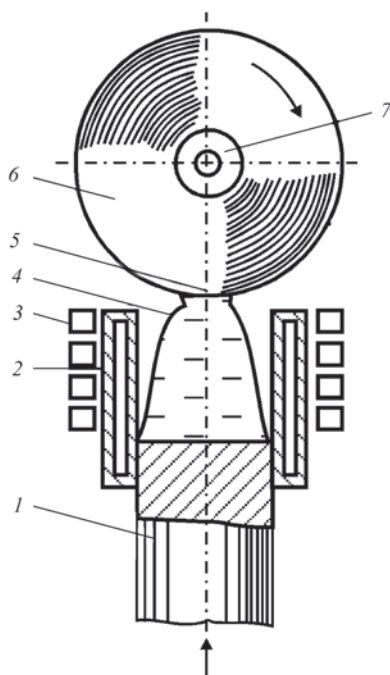


Рис. 7. Схема получения металлических заготовок типа «диск» из расплава: 1 — расходимая заготовка; 2 — секционный кристаллизатор; 3 — индуктор; 4 — металлическая ванна; 5 — контактная зона заготовки с металлической ванной; 6 — намораживаемая заготовка (диск); 7 — затравка

плавляют на высоту кристаллизатора, затем опускают его вниз до нижнего края кристаллизатора и снова наплавляют слиток без его перемещения (длина слитка до 2000 мм).

Процесс комбинированной выплавки слитков происходит следующим образом. Поддон и индуктор вначале плавки устанавливают внизу кристаллизатора. На поддоне наводят металлическую ванну и, подавая порционно шихту, производят наплавление слитка на высоту секционного кристаллизатора (около 1,0 м). Далее подачу шихты прекращают и слиток вместе с индуктором опускают вниз в исходное положение, соответствующее началу плавки. Опускание индуктора можно производить не отключая питание индуктора. При отключенном питании индуктора ванна кристаллизуется и слиток опускают вниз без расплавления

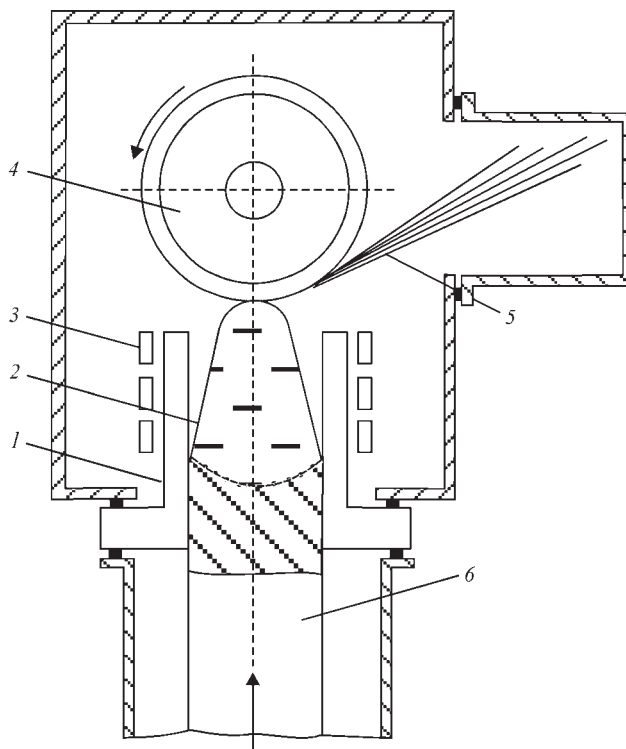


Рис. 8. Схема получения быстроокаленных чешуйчатых материалов: 1 — секционный кристаллизатор; 2 — металлическая ванна; 3 — индуктор; 4 — диск-кристаллизатор; 5 — быстроокаленные чешуйки; 6 — расходимая заготовка

ленного металла. В нижнем крайнем положении возобновляется подача питания на индуктор и на слиток подается шихта в количестве, необходимом для наведения ванны, т. е. слиток выполняет роль затравки.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны два процесса на базе ИПСК: послойное намораживание изделий в виде тел вращения из расплава (рис. 7) и диспергирование расплава с получением быстроокаленных чешуек или ленты (рис. 8).

Использование индукционной плавки в секционном кристаллизаторе позволяет исключить во время плавки контакт жидкого металла с огнеупорами и таким образом получать высококачественные материалы и изделия из высокорееакционных

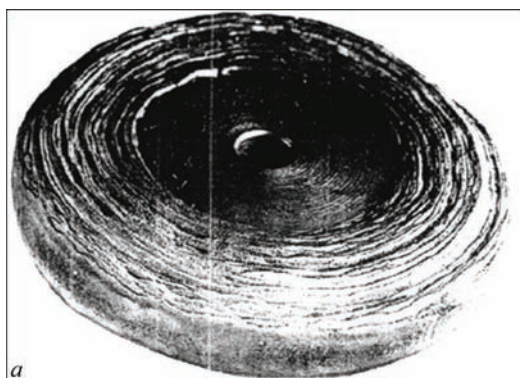


Рис. 9. Внешний вид изделия типа «диск» (а) и макроструктура металла (б)

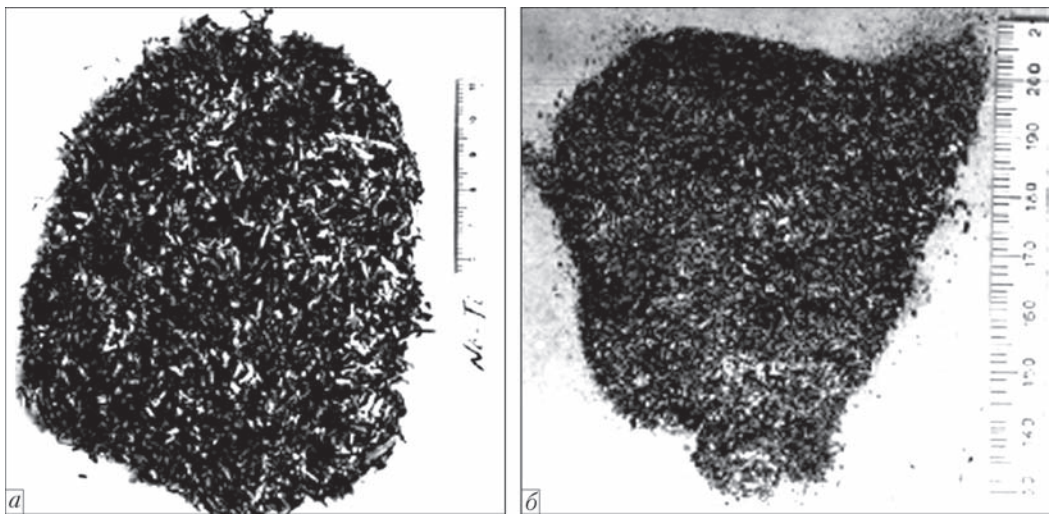


Рис. 10. Быстрозакаленные металлические чешуйчатые материалы: а — сплав системы Ni–Ti (нитинол); б — магнитный сплав системы Nd–Fe–В

Т а б л и ц а 3. Показатели коэрцитивной силы магнитного сплава системы Nd–Fe–В		
Способ получения магнитного материала	Коэрцитивная сила, кЭ	
	Без термообработки	После термообработки
Плавка в индукционной печи с последующей разливкой в щелевую изложницу	5,0	6,7
Быстрозакаленные чешуйки, полученные на установке ИПСК	9,8	14,0

металлов и сплавов, содержащих эти элементы в качестве легирующих, например, титана и его сплавов.

На рис. 9 показано металлическое изделие типа «диск» диаметром 130 мм, полученное на лабораторной установке путем послойного намораживания непосредственно из расплава. Макроструктура металла мелкозернистая.

Процесс диспергирования позволяет получать пластинки чешуйчатой формы (ПЧФ) толщиной 15...50 мкм (рис. 10). Скорость кристаллизации достигает $1\cdot10^6\ldots1\cdot10^7$ град/с.

Столь высокие скорости кристаллизации металла приводят к формированию уникальной структуры, которая обуславливает хорошие показатели многих физико-механических характеристик.

Так, коэрцитивная сила магнитного сплава системы Nd–Fe–В возросла более чем в два раза по сравнению со сплавом, который получен традиционным способом (табл. 3).

Таким образом, приведенные примеры практического применения индукционной плавки (ИПСК) свидетельствуют о широких технологи-

ческих возможностях этого процесса и, на наш взгляд, показывают перспективные направления его развития там, где в ближайшие годы можно ожидать хороших результатов. Разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины процесс ИПСК позволяет создавать сравнительно простое плавильное оборудование, пригодное для переплава как расходующих мерных заготовок, так и кусковой шихты, и выплавлять слитки высокого качества.

Список литературы

1. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. (1968) *Индукционные печи для плавки металлов и сплавов*. Москва, Металлургия.
2. Слухоцкий А. Е., Немков В. С., Павлов Н. А., Бамунэр А. В. (1981) *Установки индукционного нагрева*. Слухоцкий А. Е. (ред.). Ленинград, Энергоиздат.
3. Бабат Г. И. (1965) *Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение*. Москва–Ленинград, Энергия.
4. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. (1972) *Холодные тигли*. Москва, Металлургия.
5. Григоренко Г. М., Шейко И. В. (2006) *Индукционная плавка металлов в холодных тиглях и охлаждаемых секционных кристаллизаторах*. Киев, Сталь.

References

1. Farbman, S.A., Kolobnev, I.F. (1968) *Induction furnaces for melting of metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Slukhotsky, A.E., Nemkov, V.S., Pavlov, N.A., Bamuner, A.V. (1981) *Induction heating units*. Ed. by A.E. Slukhotsky. Leningrad, Energoizdat [in Russian].
3. Babat, G.I. (1965) *Induction heating of metals and its industrial application*. Moscow–Leningrad, Energiya [in Russian].
4. Petrov, Yu.B., Ratnikov, D.G. (1972) *Cold crucibles*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Grigorenko, G.M., Shejko, I.V. (2006) *Induction melting of metals in cold crucibles and cooled sectional mould*. Kiev, Stal [in Russian].

ИНДУКЦІЙНА ПЛАВКА В СЕКЦІЙНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Б. Є. Патон, Г. М. Григоренко, І. В. Шейко

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

Наведені наукові і практичні чинники прогресивного процесу, в основу якого закладено індукційний нагрів та плавлення металу з формуванням зливка у секційному охолоджуваному кристалізаторі. Описані особливості плавлення і кристалізації металу у секційному кристалізаторі. Наведені технічні характеристики установок (печей), розроблених в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Представлені дані щодо якості виплавленого металу та надана оцінка перспективних галузей застосування описаного процесу. Бібліограф. 5, табл. 3, іл. 10.

Ключові слова: індукційний нагрів; електромагнітне поле; індуктор; зливки; металева ванна; кристалізація; швидкозагартувана луска; структура

INDUCTION MELTING IN SECTIONAL MOLD

B.E. Paton, G.M. Grigorenko, I.V. Sheyko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The scientific and practical aspects of the progressive process based on induction heating and melting of metals with the ingot formation in a sectional cooled mold are presented. The features of melting and crystallization of the metal in a sectional mold are described. The technical characteristics of installations (furnaces) are given developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. The data on the quality of the produced metal are presented and the promising areas for application of the described process are evaluated. Ref. 5, Tabl. 3, Fig. 10.

Key words: induction heating; electromagnetic field; inductor; ingot; metal pool; crystallization; rapidly quenched flakes; structure

Поступила 03.10.2018

РАСШИРЕНИЕ СОРТАМЕНТА ПРОДУКЦИИ НА «АЗОВСТАЛЬ»



Для повышения конкурентоспособности МК «Азовсталь» Группы Метинвест продолжает осваивать новые и совершенствовать имеющиеся виды продукции. Среди новинок — слэбы толщиной 300 мм, адаптированные к потребностям заказчиков из Европы и Азии.

Для выпуска нового вида продукции переоборудована одна из машин непрерывного литья заготовок конвертерного цеха. Закуплено дополнительное оборудование и разработаны новые режимы охлаждения для исключения появления трещин и других поверхностных дефектов металла. Комбинат уже отгрузил 10 тыс. т такой продукции предприятиям Ferriera Valsider и Metinvest Trameal.

Также выпущены другие новинки плоского проката, которые ранее не производились на меткомбинате. Например, листовой прокат СТЗсп толщиной 7 мм необычен не только своим размером (в последние годы минимальная толщина листа стана 3600 составляла 8 мм), но и усовершенствован в части требований к соотношению предела текучести к пределу прочности. Обновлен химический состав и листового проката АНЗ6, ужесточены требования к величине углеродного эквивалента (<https://www.azovpromstal.com>).

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО И ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

М. И. Гасик, Ю. С. Пройдак

Национальная металлургическая академия Украины.
49005, г. Днепр, пр. Гагарина, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Обобщены и проанализированы результаты впервые проведенных кафедрой электрометаллургии НМетА Украины и заводом «Днепроспецсталь» опытно-промышленных масштабных работ по повышению качества колесной стали способами электрошлакового и вакуумно-дугового переплава. Приведены маршрутная схема получения расходных электродов из мартеновской (печь 250 т) и электропечной (ДСП 30 т) стали, характеристики установок для электрошлакового (ОКБ-905, ОКБ-1065) и вакуумно-дугового (ДСВ-63) переплавов. Рассмотрены физико-химические процессы и механизмы повышения качества колесной стали при электрошлаковом переплаве. Приведены и обобщены результаты испытаний механических свойств металла цельнокатаных колес, произведенных из слитков стали после электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов. Рассмотрены направления работ по повышению качества осевой стали марки EA1N для железнодорожных осей, производимых в настоящее время из непрерывно-литых блюмов кислородно-конвертерной стали и слитков электроласти, подвергающихся прокатке с последующей ковкой. Обобщены вопросы проведения опытно-промышленных исследований по дальнейшему повышению качества железнодорожных осей, полученных из слитков электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов. Библиогр. 20, табл. 11, ил. 4.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; вакуумно-дуговой переплав; металл; качество; кристаллизатор; свойства; цельнокатаные колеса; железнодорожные оси

Возрастание удельной нагрузки и увеличение скорости движения поездов предъявляют все более высокие требования к физико-механическим свойствам металла и цельнокатаным колесам. Введенный в 1982 г. стандарт (ГОСТ 10791–81 «Колеса цельнокатаные») регламентировал химический состав колесной стали, в том числе и ванадийсодержащей марки, некоторые режимы, технологические параметры производства и свойства цельнокатаных колес. Следует особо отметить, что этим стандартом регламентированы показатели, которые в настоящее время гарантированно обеспечиваются металлургическими заводами. С января 1991 г. введен в действие новый ГОСТ 10791–89, который предусматривал обязательную внепечную обработку — продувку инертными газами, ужесточение требований по среднему баллу неметаллических включений, контроль напряженного состояния, отмену испытаний на прогиб дисков и ряд требований к качеству поверхности колеса (антикоррозионное покрытие, зачистку и т.д.).

Качество цельнокатаных колес для железнодорожного транспорта в текущее время должно соответствовать нормам сдаточного контроля по ГОСТ 10791-2011, ТУ У 27.1-23365475-663:2011. Ниже приведены результаты проведенных в разные годы работ по дальнейшему повышению каче-

ства колесной стали способами электрошлакового (ЭШП) и вакуумно-дугового переплава (ВДП).

Получение электродов и технология рафинирующих переплавов. В работах [1–3] исследовано влияние степени десульфурации металла, изменения концентрации примесей цветных металлов, количества и состава неметаллических включений на свойства колесной стали при ЭШП. Электрошлаковому и вакуумно-дуговому переплаву подвергали электроды, изготовленные из электропечного и мартеновского металла (рис. 1). Для ЭШП и ВДП применяли расходные электроды, получаемые отливкой их в специальные изложницы с последующей прокаткой или ковкой. Одним из наиболее перспективных способов изготовления расходных электродов является отливка их на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) или машине полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ). Это позволяло существенно снизить расходные коэффициенты металла. В проведенных опытах расходные электроды колесной стали, выплавленной в 30-тонной электропечи, получали на заводе «Днепроспецсталь» на МПНЛЗ.

Металл на МПНЛЗ разливали в два ручья: первый ручей — кристаллизатор сечением 370×370 мм для ЭШП и второй — кристаллизатор диаметром 405 мм для ВДП. Из мартеновского металла электроды для ВДП изготавливали спо-

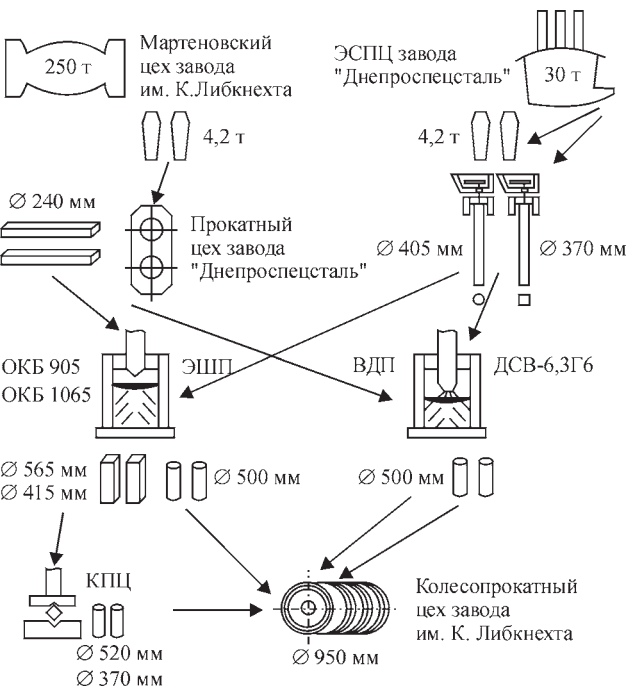


Рис. 1. Технологическая схема выплавки, разливки и рафинирования колесной стали

собою ковки слитков до диаметра 405 мм, а для ЭШП — путем прокатки до сечения 240×240 мм. Электрошлаковый переплав электродов из мартеновской стали (М) производили на установке ОКБ-905 (две плавки), а электродуговой (ОД) — на установке ОКБ-1065 (три плавки). В обоих случаях использовали стандартный флюс АНФ-6 состава, %: CaF₂ 65; Al₂O₃ 30; CaO 35; SiO₂ 0,40; MnO 0,64; Fe₂O₃ 0,46. Переплав вели по 1-й группе, где за основу взята существующая технология переплава углеродистой стали.

С целью исключения обжата квадратных слитков ЭШП сечением 565×565 и 415×415 мм в кузнечном цехе до круглого сечения диаметром 520 и 380 мм (требования технологии изготовления колес) исследована технология получения слитков ЭШП круглого сечения, для чего использовали кристаллизатор ВДП диаметром 500 мм. ЭШП производили на установке ОКБ-1056 с наведением жидкой ванны расходуемым электродом. При переплаве отклонений от технологии не было, однако отсутствие у кристаллизатора конусности

вызвало ряд трудностей при извлечении из него слитка. Некоторые технологические параметры плавов приведены в табл. 1.

Вакуумно-дуговой переплав колесного металла электродуговой и мартеновской выплавки производили на установке ДСВ-6,3Г6 в кристаллизатор диаметром 500 мм. Рабочее давление в плавильном пространстве не превышало 1,33·10⁻³ ГПа, величина тока равнялась 9,5 кА. С целью уменьшения угара марганца усадочную раковину выводили с подачей в печь аргона. Технологические параметры плавов приведены в табл. 2.

Головная часть слитков ЭШП и ВДП, извлеченных из кристаллизаторов, имела температуру до 800 °С. Для предотвращения образования трещин слитки помещали в футерованные неотапливаемые колодцы, где они медленно охлаждались до 150...200 °С. Слитки ЭШП сечением 565×565 и 415×415 мм перековывали в кузнечно-прессовом цехе на круглые диаметром 520 и 380 мм соответственно.

Качество металла ЭШП. При переплаве электродов колесной стали мартеновской и электродуговой выплавки с использованием флюса АНФ-6 и аргона в количестве 6,6...8,6 м³/т угар марганца и кремния был практически полностью исключен. В то же время при переплаве стали без применения защитной атмосферы (плавки 1Ш и 3Ш) угар марганца и кремния составил 8 и 16 % соответственно (табл. 3).

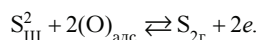
При ЭШП происходит интенсивная десульфурация металла, в результате которой содержание серы в слитках снижается на 66 % (плавки 1Ш, 3Ш) по сравнению с ее содержанием в расходуемых электродах. При входе участка электрода в зону термического влияния на стадии его расплавления наступает диссоциация сульфидных включений. Вследствие высокого температурного и концентрационного градиента в этой зоне имеет место диффузия серы из расходуемого электрода в пленку жидкого металла. В высокотемпературной зоне расходуемого электрода еще до стадии его плавления в результате перераспределения содержание серы снижается до ее концентрации в лунке жидкого металла. Удаление серы из капель

Таблица 1. Технологические параметры ЭШП колесной стали мартеновской (М) и открытой электродуговой (ОД) выплавки [1, 2]								
Плавка	Металл	Установка	Масса слитка, т	Сечение кристаллизатора, мм	Расход флюса, кг/т	Скорость наплавления, кг/мин	Расход инертного газа, м ³ /т	Расход электроэнергии, кВт·ч/т
1Ш	ОД	ОКБ-1065	4,160	565×565	45,5	8,65	—	1463
2Ш	—»—	—»—	3,600	—»—	55,5	8,67	8,67	1471
3Ш	—»—	—»—	4,060	Ø500	41,0	7,8	—	1522
4Ш	М	ОКБ-905	2,350	415×415	36,0	6,65	6,65	1710
5Ш	—»—	—»—	3,300	—»—	37,0	6,70	6,72	1573

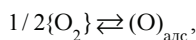
Таблица 2. Технологические параметры ВДП колесной стали мартеновской (М) и открытой электродуговой (ОД) выплавки

Плавка	Металл	Установка	Масса слитка, т	Натекание, л·мкм/с	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Угар, кг	Скорость направления, кг/мин
1ВД	ОД	ДСВ-6,3Г6	3,660	48	1042	5,0	5,20
2ВД	-»-	-»-	3,800	47	1054	2,0	5,50
3ВД	М	-»-	2,900	46	1030	2,6	5,68

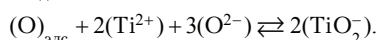
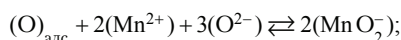
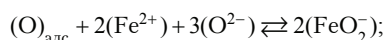
электродного металла в процессе нахождения их в межэлектродной области протекает подобно обессериванию эмульгированного металла при внепечной обработке стали синтетическим шлаком. Содержание серы в отработанных шлаках существенно не изменялось, а в некоторых случаях снижалось благодаря окислению ее на поверхности шлаковой ванны по реакции



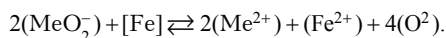
Одним из источников поступления кислорода при ЭШП являются окислы, образующиеся на поверхности электрода в процессе переплава. За основу можно принять механизм окисления шлаковой ванны и передачи кислорода жидкому металлу [3, 4]. На поверхности шлаковой ванны происходит адсорбция кислорода



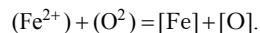
которая сопровождается ионизацией атомов кислорода и окислением присутствующих в шлаке катионов железа, марганца, титана и других низшей валентности до катионов высшей валентности:



Анионы FeO_2^- и TiO_2^- диффундируют через шлак к металлу. На границе шлак–металл анионы трехвалентных металлов восстанавливаются до двухвалентных:

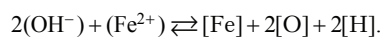
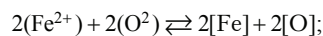
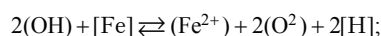
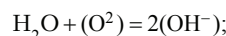


Часть ионов Fe^{2+} и O^{2-} , обменявшись зарядами, переходят в металл:



Таким образом, при наличии в шлаке окислов элементов с переменной валентностью, последние могут быть передатчиками кислорода из атмосферы в металл.

Возможна также транспортировка кислорода из газовой фазы в металл в результате растворения в шлаке водяных паров:



При этом в металл поступает не только кислород, но и водород.

Фактическое содержание кислорода в металле ЭШП, приведенное в табл. 4, показывает, что в металле ЭШП электродуговой и мартеновской выплавки снижение кислорода в среднем составило 38 и 55 % соответственно.

Предполагая, что в жидкой металлической ванне оксидные включения отсутствуют, можно заключить, что в процессе кристаллизации слитка ЭШП в нем образуются эндогенные включения. Химический состав и количество этих включений определяются активностью раскислителей, присутствующих в металле, и количеством растворенного в металле кислорода. В случае получения металла ЭШП особой чистоты по кислороду и, следовательно, по оксидным включениям, можно использовать при ЭШП кислые шлаки.

Таблица 3. Химический состав колесной стали мартеновской (М) и электродуговой (ОД) выплавки в процессе ЭШП, %

Плавка	Металл	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	ОД	0,55	0,73	0,33	0,011	0,012	0,13	0,04
1Ш	ОД+ЭШП	0,57	0,68	0,28	-»-	0,004	0,11	0-»-
2Ш	ОД+ЭШП	-»-	0,73	0,32	0,010	0,008	0,13	0,03
3Ш	ОД+ЭШП	0,55	0,65	0,26	-»-	0,004	0,12	0,04
	М	0,59	0,76	-»-	-»-	0,027	0,11	0,15
4Ш	М+ЭШП	0,56	0,73	0,25	-»-	0,015	-»-	0,10
	М	0,57	0,75	0,37	0,013	0,021	0,13	0,16
5Ш	М+ЭШП	-»-	0,72	0,34	-»-	0,012	-»-	0,13

Таблица 4. Содержание кислорода и азота в колесной стали ЭШП, %			
Плавка	Металл	Кислород	Азот
	ОД	0,0043	0,0104
1Ш	ОД+ЭШП	0,0024	0,0100
2Ш	ОД+ЭШП	0,0030	0,0102
3Ш	ОД+ЭШП	0,0022	0,0098
	М	0,0077	0,0022
4Ш	М+ЭШП	0,0031	0,0020
5Ш	М+ЭШП	0,0038	0,0021

Расчетами, проведенными с использованием математической модели, показано, что с точки зрения уменьшения перехода водорода из атмосферы в слиток ЭШП при прочих равных условиях предпочтения заслуживают печи с круглым кристаллизатором. Поэтому в промышленных плавках был опробован ЭШП заготовок с использованием круглого кристаллизатора диаметром 500 мм.

Определение остаточных концентраций водорода методом вакуум-плавления в образцах, вырезанных из диска колеса, подтвердило эффективность использования кристаллизаторов круглого сечения. Содержание водорода в металле ЭШП в кристаллизаторе диаметром 500 мм составило $2,3 \cdot 10^{-5}$ % (плавка 3Ш), а при ЭШП в кристаллизаторе сечением 565×565 и 415×415 мм — $5,5 \cdot 10^{-5}$ и $6,8 \cdot 10^{-5}$ % соответственно.

Поведение азота при ЭШП зависит от исходного содержания его в металле, формы, в которой он присутствует в стали, а также от состава применяемого флюса, режима ЭШП и т. д. В условиях ЭШП среднеуглеродистой колесной стали на флюсе АНФ-6 (система $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$) возможно образование в шлаке ионов CN^- и перенос азота из газовой фазы в металл. Приведенные в табл. 4 результаты исследования содержания газов подтверждают, что в процессе ЭШП содержание азота снижается на 30 %.

Металлографические исследования показали, что в исходном металле мартеновской и электродуговой выплавки неметаллические включения представлены, в основном, сульфидами и оксидами. Сульфиды MnS и $(\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x})\text{S}$ округлой формы, размером 5...10 мкм. Кислородные включения в электропечном металле присутствуют в виде Al_2O_3 , а также шпинели MgOAl_2O_3 сложного состава. В мартеновской колесной стали включения представ-

Таблица 5. Содержание мышьяка и меди в колесной стали ЭШП и ВДП исходного мартеновского металла, %			
Плавка	Металл	As	Cu
	Исходный	0,004	0,14
4Ш	М+ЭШП	»-	»-
5Ш	М+ЭШП	»-	0,10
3В	М+ВДП	0,002	0,06

лены силикатами марганца MnOSiO_2 и 2MnOSiO_2 , шпинели сложного состава $(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ и стекловидной составляющей. В стали после ЭШП основным видом включений в металле, независимо от способа выплавки, являются оксисульфиды размером 5...15 мкм, которые представлены сульфидами сложного состава и оксидами типа Al_2O_3 , шпинели AlOAl_2O_3 и более сложного состава.

Результаты оценки неметаллических включений по ГОСТ 1778–70 показали, что наиболее чистый металл получен по технологии — открытая дуговая печь + электрошлаковый переплав.

Качество металла ВДП. Для обеспечения процессов рафинирования металла при ВДП необходимы низкое давление в кристаллизаторе печи, высокая температура и относительно небольшая скорость оплавления электрода. Как известно, удаление включений при рафинирующем переплаве в вакууме может происходить двумя путями: всплыванием их или выносом на поверхность потоками металла и диссоциацией вещества включений с последующим удалением из металла одного или обоих элементов, образующих включения, в виде газообразных соединений CO , N_2 и др.

Исследования показали, что в металле ВДП мартеновских заготовок меньше, по сравнению с металлом ЭШП, примесей цветных металлов. Так, концентрация мышьяка и меди в металле ВДП исходной мартеновской плавки снизилась на 50 и 57 % соответственно (табл. 5).

Представляет практический интерес физико-химический анализ процессов испарения примесей цветных металлов при ВДП. Как известно, в процессе ВДП рафинирование стали идет за счет испарения примесей, включая и цветные. Скорость испарения примесей из расплава описывается уравнением Лэнгмюра:

$$I_i = \alpha_i (7,754) v_i N_i P_i^0 (M_i / T)^{1/2} A_p,$$

где α_i — коэффициент испарения примеси; v_i — коэффициент активности примеси; N_i — атомная доля примеси; P_i^0 — давление пара чистой примеси; M_i — атомный вес; T — температура; A_p — поверхность ванны жидкого металла.

Расчетами [5] и промышленными испытаниями на установках ВДП, ДСВ-6, ЗГ6 установлено, что при ВДП такие примеси, как мышьяк, удаляются более интенсивно, чем медь.

Наряду с положительным эффектом рафинирования при ВДП наблюдаются и отрицательные явления. Испарение компонентов, имеющих высокую упругость паров, может приводить к снижению легирующих элементов, как, например, марганца, магния, кальция, селена и др. Скорость перехода компонентов из расплава в газовую фазу

Т а б л и ц а 6. Химический состав колесной стали мартеновской (М) и электродуговой (ОД) выплавки при ВДП, %

Плавка	Металл	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	ОД	0,55	0,73	0,33	0,011	0,012	0,13	0,04
1ВД	ОД+ВДП	—»—	0,64	0,32	0,013	—»—	—»—	—»—
2ВД	ОД+ВДП	0,52	0,56	0,33	0,014	—»—	0,14	—»—
	М	0,57	0,75	0,37	0,013	0,021	0,013	0,16
3ВД	М+ВДП	0,52	0,63	0,36	0,014	0,019	0,012	0,14

в условиях вакуума определяется массопереносом компонента из расплава к поверхности раздела металл–газ собственно испарением (десорбцией).

Авторы работы [6] изучили влияние технологических параметров ВДП на снижение угара (испарения) марганца, а также на изменение содержания других элементов и распределение примесей. При использовании уравнения Лэнгмюра, зависимости скорости испарения марганца от содержания марганца в металле, а также данных статистической обработки с использованием парной корреляции получено следующее уравнение для оценки угара марганца:

$$[Mn] = \frac{0,029\{[Mn] - 0,45\}S}{V},$$

где S — площадь кристаллизатора, мм²; V — скорость плавления, г/с.

Прогнозировать угар марганца при различных условиях кристаллизации можно также с помощью уравнения, связывающего концентрацию марганца в исходном и переплавленном металле со скоростью плавки и размерами электрода и слитка [7]:

$$\ln \frac{[Mn]_a}{[Mn]_c} = K_{Mn} \frac{1}{W_n} \frac{F_3}{F_k},$$

где $[Mn]_a$ и $[Mn]_c$ — концентрация марганца в электроде и слитке соответственно, %; K — коэффициент испарения, см/с; W_n — скорость наплавления, кг/мин; F_3 — площадь зазора между электродом и кристаллизатором, мм²; F_k — площадь кристаллизатора, мм².

Сделан вывод, что процесс испарения марганца при ВДП частично лимитируется диффузией атомов через пограничный слой у поверхности раздела металл–газ.

Таким образом, с целью уменьшения угара марганца необходимо при переплаве сокращать зазор между электродом и кристаллизатором, увеличивать силу тока, применять инертный газ, поток которого в вакуумной системе должен регулироваться для поддержания давления в зоне дуги выше упругости пара марганца, но в пределах, применяемых для ВДП. В связи с этим ВДП колесной стали производили при отношении диаметра электрода и кристаллизатора 0,80, плавки заканчивали на рабочем режиме 9,5 кА с использованием инертной атмосферы.

Исследование химического состава металла ВДП показало, что содержание кремния, хрома, никеля, алюминия практически не изменяется (табл. 6).

Как известно, на скорость поглощения или удаления азота в тигле вакуумной индукционной печи оказывает существенное влияние присутствие в металле поверхностно-активных элементов — кислорода и серы. Полагают, что такое влияние связано с уменьшением числа вакансий на границе раздела фаз вследствие обогащения границ этими элементами. Анализ данных подтверждает зависимость степени деазотации от концентрации серы в металле. Так, например, при содержании серы в исходном мартеновском металле 0,021 % степень деазотации составляет 18 %, а при содержании серы в электропечном металле 0,012 — 40 % (табл. 7).

Отсюда можно предположить, что переход атомов азота через поверхность раздела металл–газовая фаза может лимитировать весь процесс удаления азота при ВДП.

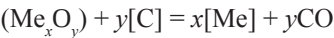
Исследование поведения водорода как при ВДП, так и при ЭШП сопряжено с трудностями отбора проб. Поэтому детально этот вопрос не рассматривался. На основании результатов, полученных при анализе поведения марганца и азота, сделаны некоторые выводы относительно удаления водорода. Согласно данным работы [8] принимаем константу скорости удаления водорода в 6–7 раз больше, чем азота, т. е. $(1...2) \cdot 10^{-2}$ см/с. При этом подразумевается, что в результате переплава в вакуумной дуговой печи содержание водорода должно снизиться, по сравнению с исходным, более чем на порядок, что и наблюдается в действительности.

Переплав металла в вакуумной дуговой печи сопровождается эффективным удалением кислорода, количество которого обусловлено, главным образом, присутствием в стали продуктов реакций раскисления и вторичного окисления металла.

Т а б л и ц а 7. Содержание кислорода, азота и серы в колесной стали при ВДП, %

Плавка	Металл	N	O	S
	ОД	0,0104	0,0043	0,012
1ВД	ОД+ВДП	0,0062	0,0024	—»—
2ВД	ОД+ВДП	0,0059	0,0021	—»—
	М	0,0022	0,0077	0,021
3ВД	М+ВДП	0,0018	0,0023	0,019

Рафинирование металла от кислорода происходит следующим образом [9]: частичное раскисление стали углеродом при взаимодействии его с кислородом легко растворимых окислов в пленке жидкого металла на торце электрода по реакции



и значительное выделение кислородных включений на поверхность расплава. Наиболее вероятным местом полного протекания процессов удаления кислорода является поверхность жидкого металла.

Исследования природы сульфидных включений показали, что они образуются из зародышей, возникающих на границе раздела фаз. Включения больших размеров (4,5...40,0 мкм) образуются в объеме пересыщенной жидкой фазы. Начало выделения сульфидных включений обусловлено не только концентрацией серы, но и повышением ее активности вследствие ликвации углерода.

Загрязненность исходного металла мартеновской и электродуговой выплавки, а также ВДП исследовали по ГОСТ 1778–70 методом подсчета включений определенного балла, находящихся в поле зрения. В основном в металле ВДП присутствуют сульфидные и оксидные включения, а силикатные настолько дисперсны, что не могут быть оценены по применяемой шкале.

Флокеночувствительность металла опытных колес определяли на всех плавках. Исследования показали, что все колеса обладают противфлокеным иммунитетом.

Механические свойства металла ЭШП и ВДП. Глубокое рафинирование металла от неметаллических включений и газов в ходе переплавных процессов, уменьшение дендритной и химической неоднородности обеспечивают получение слитка с плотной макроструктурой, повышение уровня и сокращение разброса механических свойств стали.

Неметаллические включения влияют на величину зерна и определяют состояние их границ, а

также выступают в роли концентраторов напряжений в металле. Исследования [10] по определению неоднородности напряжений вокруг включений методом замера микротермоэлектродвижущей силы на границе металл–включение и рентгенографические исследования напряжений II рода показали, что наибольшие значения напряжений получены вокруг недеформирующихся включений глинозема и высокоглиноземистых алюмосиликатов неправильной формы. Максимум напряжений вокруг отдельных включений соответствует наиболее остроугольным участкам поверхности включения. Величина напряжений вокруг пластичных включений зависит от их размеров.

Экспериментами установлено (табл. 8), что благодаря направленной кристаллизации металла в процессе ЭШП и ВДП, способствующей измельчению и более равномерному распределению неметаллических включений, колесная сталь, наряду с повышенными прочностными свойствами, имеет значительно больший запас пластичности, что хорошо согласуется с данными работы [11].

Одной из основных характеристик колесной стали является величина ударной вязкости, которая, как уже отмечалось, при 20 °С должна составлять не менее 0,2 МДж/м².

Исследование изменения величины ударной вязкости (a_v) металла диска колес в зависимости от температуры производили на образцах размером 10×10×55 мм с надрезом типа I по ГОСТ 9454–60 на маятниковом копре ударного действия. Образцы вырезали из диска в месте перехода его в ступицу в радиальном направлении.

Результаты проведенных исследований показали (рис. 2), что металл ЭШП, по сравнению с обычным, имеет в два раза большее значение ударной вязкости как при положительных, так и отрицательных температурах.

Величина a_v металла ВДП, содержащего в своем составе сульфидов в два раза больше, чем металл ЭШП, при 20 °С имеет меньшее значение (0,4

Т а б л и ц а 8. Механические свойства колес диаметром 950 мм, изготовленных из металла мартеновской (М) и электродуговой (ОД) выплавки, а также рафинирующих электропеплавов						
Металл	Плавка	Номер колеса	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	Твердость, <i>НВ</i>
				Не менее		
ГОСТ 10791–81			911...1107	8	14	255
			Исходный электропечной			
ОД+ЭШП	1Ш	643	927	11,62	23,37	262
ОД+ЭШП	2Ш	632	1010	17,4	38,0	277
ОД+ЭШП	3Ш	630	990	17,2	41,0	270
ОД+ВДП	1ВД	637	1000	17,0	39,0	277
ОД+ВДП	2ВД	642	1020	17,0	44,0	272
			Исходный мартеновский			
М+ЭШП	4Ш	624	1000	17,5	39,0	273
М+ЭШП	5Ш	626	990	17,0	40,0	268
М+ВДП	3ВД	633	1010	18,0	39,0	280

и 0,52 МДж/м² соответственно), однако в области –60 °С достигает 0,22 МДж/м².

Минимальным значением в области –60 °С характеризуется и металл обычной мартеновской плавки, что вызвано повышенным содержанием в нем газов, примесей, цветных металлов, серы, а также неметаллических включений.

Для определения склонности стали к хладноломкости применяли метод, основанный на визуальной оценке доли волокнистой или кристаллической составляющей в изломе. При этом кристаллическое строение излома соответствовало хрупкому разрушению, а волокнистое — вязкому.

Характер излома исследовали на сканирующем (растровом) электронном стереомикроскопе. При исследованиях использовали стандартные ударные образцы, испытываемые при температурах, °С: 20 (а, г, ж), –20 (б, д, з) и –60 (в, е, и) (рис. 3).

При 20 °С в изломе образцов наблюдались участки «чашечного» вязкого излома поверхности. Однако наряду с вязким изломом в образце мартеновской стали (а, б, в) имеются участки с типично хрупким рельефом. Переход в область отрицательных температур характеризуется кри-

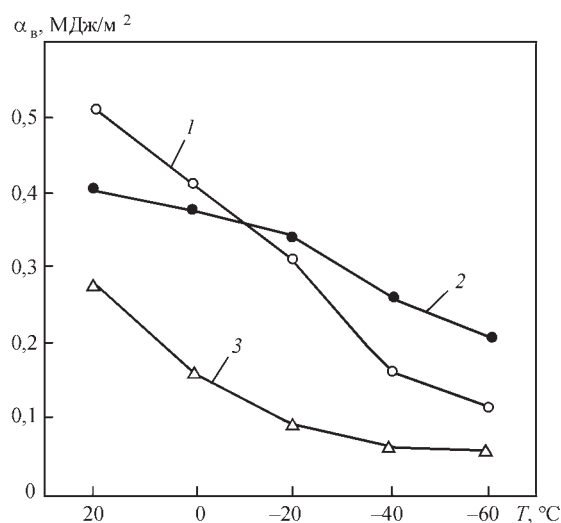


Рис. 2. Изменение ударной вязкости металла диска колес из стали ЭШП (1), ВДП (2) и исходного мартеновского металла (3) в интервале температур 20...–60 °С

сталлическим изломом, в котором в металле ВДП (г, д, е) и ЭШП (ж, з, и) вместе с элементами хрупкого излома наблюдаются участки, свидетельствующие о вязком характере разрушения стали. По мере снижения температуры микрорельеф волок-

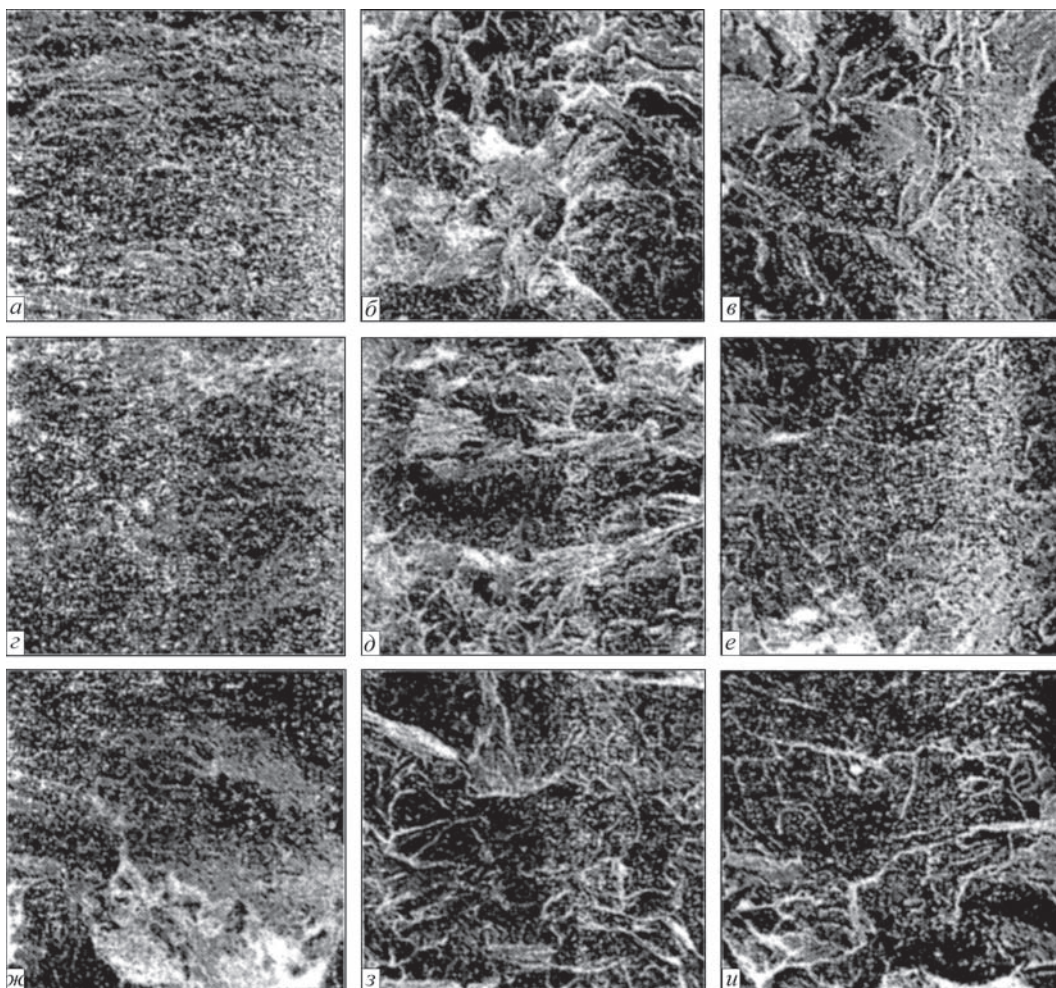


Рис. 3. Характер разрушения металла колесной стали мартеновской выплавки (а, б, в), рафинирующих переплавов ВДП (г, д, е) и ЭШП (ж, з, и) в интервале температур 20...–60 °С

нистой структуры уменьшается и практически исчезает в металле мартеновской выплавки.

За критерий склонности стали к хрупкому разрушению принята критическая температура хрупкости [12]. В результате ВДП произошло снижение критической температуры хрупкости металла всех плавок на 20 °С независимо от исходного металла и направления вырезки образцов, что имеет большое практическое значение.

Согласно данным работы [13] снижение ударной вязкости свидетельствует об уменьшении работы зарождения трещины с увеличением в стали сульфидов, что объясняется действием сульфидов как локализаторов напряжений и источников микротрещин. Однако результаты исследований показали, что металл ВДП, имеющий в своем составе сульфидов в два раза больше, чем металл ЭШП, имеет более высокие значения ударной вязкости. Поэтому влияние неметаллических включений (сульфидов) на характеристики разрушения колесной стали определяется не столько их общим содержанием, сколько их формой, размером и распределением.

Таким образом, в результате проведенных опытно-промышленных исследований по влиянию рафинирующих переплавов (ЭШП и ВДП) расходуемых электродов из металла мартеновской и электродуговой выплавки на качество колесной стали установлено существенное повышение качества металла и готовых колес за счет десульфурации стали, изменения концентрации примесей цветных металлов, количества и состава неметаллических включений, а также условий кристаллизации.

Современное состояние технологии выплавки осевой стали и задачи повышения ее качества. Актуальной задачей железнодорожного транспорта является дальнейшее увеличение пропускной способности железных дорог длиной общего назначения 22,7 км, что в значительной мере требует существенного повышения качества металла и конструктивной прочности не только цельнокатанных колес, но и железнодорожных осей [14–17]. В настоящее время подвижной грузовой состав экс-

плуатируется при нагрузке на ось вагона до 228 кН (23,25 т) и 245 кН (24,99 т) [18]. На научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 2010), посвященной решению задач повышения качества металла для железнодорожного транспорта, обсуждались и вопросы решения проблемных задач повышения нагрузки на ось колесной пары до 287 кН (29,3 т).

Несмотря на то, что черновые оси производства завода «Днепроспецсталь» сертифицированы Ассоциацией американских железных дорог и Регистром сертификации на Федеральном железнодорожном транспорте [19], решение проблемной задачи повышения нагрузки на ось колесной пары обуславливает необходимость разработки научно-обоснованных подходов к проведению опытно-промышленных экспериментов и созданию прорывных технологий выплавки электростали и производства железнодорожных осей высшего уровня качества.

Запорожский электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» имеет большой промышленный опыт в достижении высоких результатов выплавки электростали осевого сортамента ЕА1N (35Г) и производства железнодорожных осей по сквозной технологической схеме, включающей: выплавку металла полупродукта в ДСП-60, внепечное рафинирование осевой стали на установке УПК, эффективную разливку стали ЕА1N по изложницам (развес слитков 4,8 и 6,7 т), прокатку слитков, ковку и термическую обработку (нормализация, отпуск) профильных заготовок. Металл черновых осей подвергают технологическому и исследовательскому контролю размерного фактора, количества и природы неметаллических включений и механических свойств черновых осей. Результаты испытаний обрабатываются и анализируются в аспекте соответствия их свойств требованиям европейского стандарта EN 13261:2009*. В соответствии с этим стандартом сталь марки ЕА1N имеет химический состав, приведенный в табл. 9. Железнодорожные оси по механическим

Таблица 9. Химический состав сталей для черновых осей вагонов железных дорог по отечественным и зарубежным стандартам, мас. %										
Стандарт, марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	V	Ni
				Не более						
Сталь 45 ГОСТ 1050–88	0,42...0,50	0,17...0,37	0,50...0,80	0,035	0,040	0,25	0,30	–	–	0,30
ОС ГОСТ 4728–96	–»–	0,15...0,35	0,60...0,90	0,040	–»–	0,30	0,25	–	–	–»–
Сталь 35 ГОСТ 4543–71	0,35...0,40	0,17...0,37	0,70...1,00	0,035	0,035	–»–	0,30	0,15	0,05	–»–
EA1N EN 13261	0,40	0,50	1,20	0,020	0,020	–»–	–»–	0,08	0,06	–»–
EA1N UIC 811-1 OR	0,37	0,46	1,12	0,040	0,040	–»–	–»–	0,05	0,05	–»–

*EN 13261:2009 «Рельсовый транспорт. Колесные пары и тележки. Оси. Требования к изделию».

Таблица 10. Механические свойства железнодорожных осей после нормализации

Стандарт	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_p , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Работа удара* KU, Дж	
				L	Q
				Не менее	
UIC 811-1 OR	550...650	320	22	25	10
EN 13261	—	—	—	30	25

*Типы образцов для проведения испытаний на ударный изгиб по ГОСТ 9454–78: тип 1 — по UIC 811-1 OR, тип 8 — по EN 13261; L и Q означают соответственно продольное и поперечное направления вырезки образцов для контроля работы удара; приведены средние значения для трех образцов при 20 °С.

Таблица 11. Оценка загрязненности стали EA1N (35Г) по шкалам ISO 4967

Количество плавок, шт.	Место отбора проб	Тип неметаллических включений, балл		Количество не соответствующих плавок по неметаллическим включениям, %
		A _{тл} (сульфиды)	B _{тл} (оксиды)	
10	Кованые черновые оси	$\frac{1,0...1,5}{1,32}$	$\frac{1,0...1,5}{1,12}$	0
20	Катаная осевая заготовка	$\frac{1,0...1,5}{1,31}$	$\frac{1,0...1,5}{1,26}$	0

Примечание. В числителе указан разбег значений, в знаменателе — средние баллы.

свойствам металла должны соответствовать нормам стандарта UIC 811-1 OR и европейского стандарта EN 13261 (табл. 10).

Прокатный передел слитков стали EA1N. В соответствии с разработанной на ПАО «Днепро-спецсталь» технологической маршрутной схемой производства черновых осей слитки горячим всадом передаются в прокатный цех на нагревательные колодцы стана 1050/950. Слитки прокатываются по спецификации кузнечного цеха на круглые заготовки. Катаные заготовки подвергаются 100%-ному ультразвуковому контролю.

Ковка профильных заготовок для железнодорожных осей. Ковка заготовок производится на радиально-ковочной машине РКМ-1000 в автоматическом режиме. С нормализационного нагрева производится правка черновых осей на установке М17280 с последующим охлаждением на воздухе. Основные размеры профильной заготовки представлены на рис. 4.

Исследование загрязненности кованых профильных заготовок осей неметаллическими включениями. Результаты контроля загрязненности стали EA1N (35Г) неметаллическими включениями, проведенного на образцах от осевых заготовок и кованых черновых осей, показаны в табл. 11.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что, в сравнении с действующей технологией конечного раскисления, по которой металл раскисляли только алюминием и силикокальцием, новая технология позволяет получать металл по неметаллическим включениям, соответствующий требованиям зарубежного стандарта EN 13261. Су-

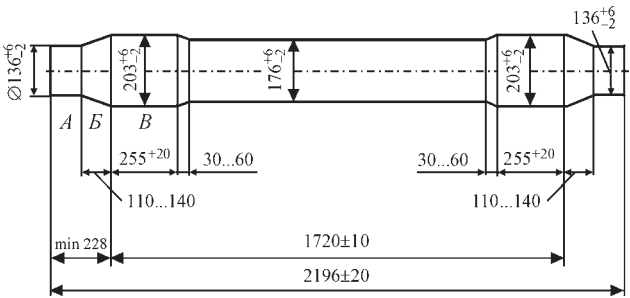


Рис. 4. Схема типовой кованой профильной заготовки для осей вагонов подвижного состава железных дорог: А — шейка оси; В — подступичная часть оси; В — ступица

щественно снижены средние баллы как оксидных (В_{тл}), так и сульфидных (А_{тл}) включений. При этом уменьшены значения средних баллов сульфидных включений на 0,3, что при уровне 1,5 балла является существенным.

Обеспечение чистоты металла осевых заготовок по неметаллическим включениям в соответствии с требованиями стандартов UIC 811-1 OR и EN 13261 и, прежде всего, по сульфидным (А_{тл}) и оксидным (В_{тл}) включениям толстой серии (при оценке ISO 4967) достигнуто за счет снижения содержания серы в металле не более чем до 0,008 % и отработки режимов комплексного раскисления и микролегирования металла титаном на стадии внепечного рафинирования его на УПК и вакууматоре.

Выводы

1. Выполнен технологический аудит действующей сквозной технологии производства кованых профильных заготовок из стали EA1N (35Г) для осей

вагонов подвижного состава железных дорог в аспекте возможности получения осей, стабильно удовлетворяющих требования (нормы) стандартов Международного союза железных дорог стандартов UIC 811-1 OR и EN 13261. Анализ данных по стали EA1N (35Г) показал, что действовавшая технология производства стали не в полной мере обеспечивала получение черновых осей как по показателям механических свойств, так и по загрязненности неметаллическими включениями.

2. Требуемое временное сопротивление черновых осей из стали EA1N (35Г) достигнуто благодаря регламентированному содержанию углерода и марганца, а также соблюдению разработанных режимов термообработки.

3. В результате проведенных исследований показаны возможные перспективы дальнейшего поиска технологических решений по производству черновых осей железнодорожного состава из непрерывнолитой заготовки вакуумированной стали. При этом решение весьма актуальной задачи повышения нагрузки на ось колесной пары может быть получено путем теоретических разработок в сочетании с опытно-промышленными исследованиями влияния переплавных процессов осевого металла способами ЭШП и ВДП.

Список литературы

1. Узлов И. Г., Гасик М. И., Есаулов А. Т. и др. (1985) *Колесная сталь*. Киев, Техника.
2. Узлов И. Г., Шнееров Я. А., Гасик М. И. и др. (1979) Разработка технологии выплавки колесной стали в электропечах. *Бюллетень ЦНИИ ЧМ*, **23**, 31–35.
3. Гасик М. И., Прождак Ю. С., Горобец А. П. (1986) ЭШП — эффективная технология повышения качества колесного и подшипникового металла. *Электрошлаковая технология*. Патон Б.Е. и др. (ред.). Киев, Наукова думка, сс. 27–31.
4. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. (1970) *Электрошлаковый переплав*. Москва, Металлургия.
5. Andreini R. J., Foster J. S. (1979) Kinetics of solute removal during electronbeam and vacuum arc melting. *J. Vac. and Metal*, **6**, 1055–1059.
6. Поволоцкий Д. Я., Кофман Ю. В., Сергеев А. Б. (1978) Влияние вакуумного дугового переплава сталей и сплавов на состав металла и распределение элементов в слитке. *Известия вузов. Черная металлургия*, **6**, 65–66.
7. Швед Ф. И., Сергеев А. Б., Карякин А. П. и др. (1973) Поведение марганца при вакуумно-дуговом переплаве стали. *Сб. тр. всесоюзной конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали»*, Челябинск, **116**, сс. 105–114.
8. Линчевский Б. В. (1970) *Вакуумная металлургия стали и сплавов*. Москва, Металлургия.
9. Чуйко Н. М., Лоза В. В. (1975) Удаление кислорода из стали при вакуумном дуговом переплаве. *Известия АН СССР. Металлы*, **1**, 7–14.
10. Шильников Г. Ю., Зимин Г. Г., Бережко Б. И. и др. (1973) Изменение в строении и свойствах стали марки 12Х1МФ, обусловленное вакуумным дуговым переплавлением. *Сб. тр. всесоюзной конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали»*, Челябинск, **116**, сс. 145–151.
11. Ахматов Ю. С., Лисняк А. Г., Перков О. Н. и др. (1978) Влияние вакуумирования колесной стали на ее свойства. *Термическая обработка металлов*, **7**, 41–42.
12. Мирошниченко Н. Г., Кузьмичев М. В., Борисова Ж. А. (1977) Взаимосвязь характеристик стали при динамических и статических испытаниях. *Там же*, **5**, 82–86.
13. Овсянников Б. М., Ладько В. Г. (1973) Зависимость вязкости разрушения конструкционных сталей от химического состава и структуры. *Специальные стали и сплавы*, **2**, 116–125.
14. Левченко Г. В., Балахова Т. В., Мосьпам В. В. и др. (2016) Обеспечение качества железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **1**, 29–33.
15. Левченко Г. В., Демина Е. Г., Воробей С. А. и др. (2009) Оценка деформированного состояния металла по изменению дендритной структуры. *Там же*, **5**, 72–75.
16. Левченко Г. В., Ершов С. В., Демина Е. Г. и др. (2008) Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей. *Там же*, **2**, 74–76.
17. Левченко Г. В., Ершов С. В., Демина Е. Г. и др. (2008) Влияние режимов деформации слитка на трансформацию дендритной структуры заготовок для производства железнодорожных осей. *Сб. науч. тр. «Информационная технология в обработке давлением»*, 27.
18. Гасик М. И., Сальников А. С., Пересащенко О. В., Лоза В. В. (2009) Разработка и промышленное освоение сквозной технологии производства кованых черновых осей из электростали EA1N (35Г). *Современная электрометаллургия*, **4**, 40–48.
19. Тумко А. Н., Логозинский И. Н., Пересащенко О. В. и др. (2010) Исследование технологических схем производства профильных осевых заготовок для подвижного состава железных дорог. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **4**, 40–43.

References

1. Uzlov, I.G., Gasik, M.I., Esaulov, A.T. et al. (1985) *Wheel steel*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
2. Uzlov, I.G., Shneerov, Ya.A., Gasik, M.I. et al. (1979) Development of technology of wheel steel melting in electric furnaces. *Bulleten TsNII ChM*, **23**, 31–35 [in Russian].
3. Gasik, M.I., Projdak, Yu.S., Gorobets, A.P. (1986) ESR – efficient technology in increase of quality of wheel and bearing metal. In: *Electroslag technology*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka, 27–31 [in Russian].
4. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Andreini, R.J., Foster, J.S. (1979) Kinetics of solute removal during electron beam and vacuum arc melting. *J. Vac. and Metal*, **6**, 1055–1059.
6. Povolotsky, D.Ya., Kofman, Yu.V., Sergeev, A.B. (1978) Influence of vacuum arc remelting of steels and alloys on composition of metal and distribution of elements in ingot. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **6**, 65–66 [in Russian].
7. Shved, F.I., Sergeev, A.B., Karyakin, A.P. et al. (1973) Behavior of manganese in vacuum arc remelting of steel. In: *Proc. of All-Union Conf. on Current Problems of Electrometallurgy of Steel, Chelyabinsk*, **116**, 105–114 [in Russian].
8. Linchevsky, B.V. (1970) *Vacuum metallurgy of steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Chujko, N.M., Loza, V.V. (1975) Removal of oxygen from steel in vacuum arc remelting. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, **1**, 7–14 [in Russian].

10. Shilnikov, G.Yu., Zimin, G.G., Berezhko, B.I. et al. (1973) Change in structure and properties of steel of 12Kh1MF grade, caused by vacuum arc remelting. In: *Proc. of All-Union Conf. on Current Problems of Electrometallurgy of Steel, Chelyabinsk*, **116**, 145–151 [in Russian].
11. Akhmatov, Yu.S., Lisnyak, A.G., Perkov, O.N. et al. (1978) Influence of vacuumizing of wheel steel on its properties. *Termich. Obrabotka Metallov*, **7**, 41–42 [in Russian].
12. Miroshnichenko, N.G., Kuzmichev, M.V., Borisova, Zh.A. (1977) Interrelation of steel characteristics in dynamic and static tests. *Ibid.*, **5**, 82–86 [in Russian].
13. Ovsyannikov, B.M., Ladko, V.G. (1973) Relationship between fracture toughness of structural steels and chemical composition and structure. *Spetsialnye Stali i Splyvy*, **2**, 116–125 [in Russian].
14. Levchenko, G.V., Balakhova, T.V., Mospam, V.V. et al. (2016) Quality assurance of railway axles produced from continuous casting billets of different section. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **1**, 29–33 [in Russian].
15. Levchenko, G.V., Demina, E.G., Vorobej, S.A. et al. (2009) Evaluation of strained state of metal on change of dendritic structure. *Ibid.*, **5**, 72–75 [in Russian].
16. Levchenko, G.V., Ershov, S.V., Demina, E.G. et al. (2008) Transformation of dendritic structure at all stages of manufacture of railway axles. *Ibid.*, **2**, 74–76 [in Russian].
17. Levchenko, G.V., Ershov, S.V., Demina, E.G. et al. (2008) Influence of modes of ingot deformation on dendritic structure transformation of billets for manufacture of railway axles. In: *Information technology in pressure treatment: Transact.*, **27** [in Russian].
18. Gasik, M.I., Salnikov, A.S., Peresadenko, O.V., Loza, V.V. (2009) Development and industrial mastering of end-to-end technology of production of forged roughing axles of electric steel EAIN (35G). *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 40–48 [in Russian].
19. Tumko, A.N., Logozinsky, I.N., Peresadenko, O.V. et al. (2010) Investigation of technological schemes in manufacture of profile axle billets for railway rolling stocks. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **4**, 40–43 [in Russian].

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО І ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕТАЛУ СУЦІЛЬНОКАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

М. І. Гасік, Ю. С. Пройдак

Національна металургійна академія України.

49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Узагальнені та проаналізовані результати вперше проведених кафедрою електрометалургії НМетА України і заводом «Дніпроспецсталь» дослідно-промислових масштабних робіт з підвищення якості колісної сталі способами електрошлакового і вакуумно-дугового переплаву. Наведені маршрутна схема отримання витратних електродів з мартенівської (піч 250 т) і електропічної (ДСП 30 т) сталей, характеристики установок для електрошлакового (ОКБ-905, ОКБ-1065) та вакуумно-дугового (ДСВ-63) переплавів. Розглянуто фізико-хімічні процеси і механізми підвищення якості колісної сталі при електрошлаковому переплаві. Наведено і узагальнено результати випробувань механічних властивостей металу суцільнокатаних коліс, вироблених із зливків сталі після електрошлакового і вакуумно-дугового переплавів. Розглянуто напрямки робіт з підвищення якості осевої сталі марки EAIN для залізничних осей, вироблених в даний час з безперервно-литих блоків киснево-конвертерної сталі і зливків електросталі, що піддаються прокатці з подальшим куванням. Узагальнено питання проведення дослідно-промислових досліджень щодо подальшого підвищення якості залізничних осей, отриманих з зливків електрошлакового і вакуумно-дугового переплавів. Бібліогр. 20, табл. 11, іл. 4.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; вакуумно-дуговий переплав; метал; якість; кристалізатор; властивості; суцільнокатані колеса; залізничні осі

APPLICATION OF ELECTRIC SLAG AND VACUUM-ARC REMELTS TO IMPROVE THE QUALITY OF THE METAL OF THE ALL-ROLLED RAILWAY WHEELS

M.I. Gasik, Yu.S. Projdak

National metallurgical academy of Ukraine.

4 Gagarina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

The results of experimental-industrial large-scale works on improving the quality of wheel steel by the methods of electric slag and vacuum arc melting, for the first time carried out by the Department of Electrometallurgy of the National metallurgical academy of Ukraine and the Dnepropetsstal plant, were summarized and analyzed. The route scale for producing consumable electrodes from open-hearth (250 t furnace) and electric furnace (30 t EAF) steel, the characteristics of installations for electros slag (OKB-905, OKB-1065) and vacuum-arc (DSV-63) remelts are presented. The physical and chemical processes and mechanisms for improving the quality of wheel steel during electros slag remelting are considered. The results of tests of mechanical properties of metal of all-rolled wheels produced from steel ingots after electros slag and vacuum-arc remelting are presented and summarized. The directions of works on improving the quality of the axial steel of grade EAIN for railway axes currently produced from continuously-cast blooms of oxygen-converting steel and electric steel ingots subjected to rolling with the following forging are considered. The problems of conducting experimental-industrial studies on further improvement of the quality of railway axes produced from electros slag and vacuum-arc remelting ingots, are summarized. Ref. 20, Tabl. 11, Fig. 4.

Key words: electros slag remelting; vacuum arc remelting; metal; quality; mold; properties; all-rolled wheels; railway axes

Поступила 20.06.2018

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

С. Н. Тимошенко¹, А. П. Стовпченко^{2,3}, Ю. В. Костецкий², М. В. Губинский⁴

¹Донецкий национальный технический университет.

85300, Донецкая область, г. Покровск, пл. Шибанкова, 2. E-mail: mail@donntu.edu.ua

²Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

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

³Инжиниринговая компания «Элмет-Рол».

03150, г. Киев, А. я. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

⁴Национальная металлургическая академия Украины.

49600, г. Днепр, просп. Гагарина, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Предложен комплекс малозатратных энергоэффективных решений модернизации дуговых сталеплавильных печей: глубокая ванна, водоохлаждаемые панели с пространственной структурой, система рассредоточенной аспирации и предварительный среднетемпературный нагрев скрапа пылегазовой средой с эффективным дожиганием СО. Методами компьютерного моделирования показано, что применение комплекса решений в 120-тонной дуговой сталеплавильной печи позволяет сократить энергопотребление на 56...68 кВт·ч/т. Библиогр. 29, табл. 6, ил. 7.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь; энергоэффективность; глубокая ванна; водоохлаждаемые элементы с объемной структурой; система рассредоточенной аспирации; среднетемпературный предварительный нагрев скрапа

Направления развития металлургического производства на долгосрочную перспективу во многом определяются экологическими требованиями, в частности, ограничением выбросов парниковых газов в атмосферу [1]. В этой связи ожидается увеличение доли производства стали в дуговых печах (ДСП), которые в настоящее время обеспечивают около трети его мирового объема, уступая конвертерному процессу [2]. В странах Европейского союза (ЕС) и США в ответ на глобальные экологические вызовы доля электростали постоянно растет и приближается к 40 и 63 % соответственно.

На этом фоне структура металлургического комплекса Украины, представленная преимущественно крупными вертикально-интегрированными компаниями, в которых сталеплавильное производство базируется на схеме доменная печь – конвертерный процесс, очевидно требует совершенствования в сторону увеличения доли ДСП.

Возможности электропечей относительно широкого выбора исходной шихты (скрап, металлized сырье, чугун) и варьирования окислительного потенциала в процессе плавки позволяют использовать их как в «большой» металлургии в технологических маршрутах производства сортового и листового проката, так и в «малой» для производства литья на машиностроительных заводах.

Для производства стали используют электродуговые печи переменного и постоянного тока.

Печи постоянного тока (ДСПТ) в сравнении с трехфазными ДСП характеризуются более устойчивым горением дуги, что способствует снижению угара железа из-за притока воздуха в рабочее пространство, уровня шума и фликер-эффекта. В «большой» металлургии преимущества ДСПТ нивелируются скоротечностью плавки полупродукта, в «малой», где сохранилась классическая технология, эти преимущества реализуются.

ДСП как энерготехнологический агрегат и задачи исследований. Важнейшим направлением совершенствования ДСП с учетом современных глобальных тенденций является повышение энергоэффективности, которое может быть достигнуто путем снижения и утилизации потерь теплоты, а также диверсификацией источников энергии, используемых в технологическом процессе.

Типовой энергетический и материальный балансы плавки одной тонны полупродукта в ДСП при интенсивной технологии [3–5] приведены ниже.

Энергетический баланс ДСП

Приход	кВт·ч	%
Электроэнергия	355	58
Химическая энергия в т. ч.:	255	42
теплота экзотермических реакций в т. ч.	212	35
окисления углерода	122	20
окисления железа	78	12
энергия топливно-кислородных горелок	43	7
Итого	610	100

Расход

Энтальпия металла	382	63
Энтальпия шлака	58	9
Потери энергии в т. ч.:	170	28
с пылегазовой средой	87	14
с водой	66	11
прочие (электрические, через футеровку)	17	3
Итого	610	100

Материальный баланс ДСП

Приход	кг
Скрап	1105
Шлакообразующие	43
Электроды	1,2
Огнеупоры	6
Природный газ	5
Кислород	58
Вода для охлаждения (оборотная)	3500
Аргон	0,02
Воздух (приток в ДСП)	140
Углеродсодержащий порошок	11
Уголь в завалку	10
Итого (без воды)	1379
Расход	
Металл (полупродукт)	1000
Шлак	107
Пылегазовая среда	272
Плавильная пыль	22
Итого	1379

Из этих данных следует, что проблема низкой энергоэффективности ДСП в решающей степени обусловлена потерями теплоты с пылегазовой средой (ПГС) и с охлаждающей водой, а также потерями железа. Потери теплоты составляют в среднем 25 % вводимой энергии или около 90 % от потерь энергии, а потери железа достигают в среднем 10,5 %, из которых 1,5...2,5 % — плавильная пыль в ПГС [3].

Утилизация теплоты, теряемой с водой в традиционных системах охлаждения ДСП, затруднена ввиду относительно невысокой температуры воды на выходе (не выше 50...60 °С), однако работы в этом направлении ведутся на основе использования турбогенератора с органическим циклом Ренкина [6]. Применение системы испарительного охлаждения, работающей под высоким (2 МПа и более) давлением, в традиционных процессах с дискретной загрузкой скрапа не оправдано ввиду

неоднородности теплового режима по ходу плавки, опасности прожога змеевиков паразитной дугой и динамических нагрузок на водоохлаждаемые элементы. В технологических процессах «flat bath» с непрерывным плавлением шихты в сталеплавильной ванне и стабильным тепловым режимом реализация испарительного охлаждения возможна, но сведений о его использовании нет.

Утилизация теплоты ПГС, включая энергию дожигания СО [7], возможна по трем направлениям: предварительный нагрев исходной шихты, выработка пара с использованием его для генерации электроэнергии и термохимическая регенерация природного газа в продуктах ПГС.

Предварительный нагрев исходной шихты. В современных ДСП применяют конвейерные, шахтные и бадьевые системы предварительного нагрева (ПН) исходной шихты. Наибольшее распространение получила технология «Consteel» компании «Tenova S.p.A.» (Италия) с непрерывной загрузкой фрагментированного скрапа на конвейере в ванну [8]. Нагрев шихты теплотой ПГС со средней температурой в период жидкой ванны 1600 °С осуществляется при фильтрации газового потока через слой скрапа. Увеличение температуры загружаемого в ДСП скрапа на каждые 100 °С позволяет при выплавке стали уменьшить удельный расход электроэнергии на 13...15 кВт·ч/т [3].

Практика эксплуатации систем ПН скрапа выявила проблему эмиссии в атмосферу высокотоксичных диоксинов и фуранов — соединений галогенов с углеводородами (PCDD/F), образующихся при нагреве рядового лома, загрязненного поливинилхлоридными пластмассами, резиной, ГСМ. Поведение PCDD/F в условиях интенсивной технологии выплавки стали в ДСП по данным [9, 10] представлено в табл. 1.

Меры по минимизации PCDD/F, в частности установка дополнительных топливно-кислородных горелок (ТКГ) и камеры термической заделки ПГС, могут в ряде случаев свести на нет экономический эффект ПН скрапа, учитывая образование СО₂ при работе ТКГ, что неприемлемо в условиях ограничений на эмиссию парниковых газов [1].

Т а б л и ц а 1. Эволюция PCDD/F в условиях электросталеплавильного производства

Стадия	Сущность процесса	Температурный интервал, °С	Действие по минимизации PCDD/F	Временной интервал (параметры) действия
1	Образование PCDD/F	500...850	Локализация	Постоянно
2	Разложение PCDD/F на исходные химические реагенты	1000...1200	Выдержка	Не менее 2 с
3	Вторичный синтез PCDD/F	800...250	Быстрое охлаждение	Не менее 300 °С в секунду
4	Удаление остаточных PCDD/F	<200	Ввод сорбентов	Перед блоком рукавных тканевых фильтров

В новых разработках систем ПН скрапа большое внимание уделяют экологической безопасности. Для обеспечения ПДК PCDD/F и СО предусмотрены камеры дожигания и спрейерного охлаждения (закалки) ПГС с окончательной дезактивацией токсинов сорбентами на основе мелкодисперсного углерода [9, 10].

Развитие сталеплавильных технологий в соответствии с программой «EU Low-carbon Roadmap» по снижению выбросов CO_2 на 34...40 % до 2030 г. связано с пересмотром технологических маршрутов в пользу мало- и безуглеродных технологий.

В шахтных ДСП нового поколения «EcoArc» компании «JP Steel Plantech» (Япония) [10], «COSS» фирмы «Fuchs Technology» (Германия) [11], «EPC» компании «CVS» (Турция) совместно с «KR Tec. GmbH» (Германия) [12] и «Quantum» фирмы «Primetals Technologies» (Великобритания) [13], как и в технологии «Consteel» реализуется процесс «flat bath». Эффективность нагрева слоя скрапа ПГС в шахте существенно выше, чем на конвейере, а двухкамерная конструкция шахты повышает экологическую безопасность ДСП в т. ч. по PCDD/F с учетом последующей дезактивации токсинов путем термической закалки (табл. 1). Компания «Primetals Technologies» осуществила пуск первой ДСП «Quantum» на заводе «Talleres y Aceros S.A.» (Мексика) и ведет строительство этих печей на заводах компаний «Acciaieria Arvedi» (Италия), «Henan Yaxin Steel Group Ltd» (КНР), ввод в эксплуатацию которых намечен на 2019 г.

Среднетемпературный ПН (до 300...450 °C) скрапа является менее энергоэффективным, чем высокотемпературный, однако позволяет избежать дополнительных расходов на нейтрализацию PCDD/F. Технология впервые была реализована на 175-тонной ДСП завода «Icdas Celik» (Турция) компанией «SMS Concast AG» (Швейцария) [14]. Но определенные недостатки, в частности нагрев шихты в загрузочной бадье, не позволили достичь по ходу плавки заданной температуры скрапа (300 °C) из-за повышенного термического сопротивления корпуса бадьи.

Выработка энергетического пара. Система «iRecovery» компании «Tenova RE Energy GmbH» (Германия) обеспечивает утилизацию 40...70 % теплоты ПГС на выработку электроэнергии с помощью пара высокого давления (до 3,5 МПа). Она установлена на заводах ЕС «Georgsmarienhütte GmbH» (140-тонная ДСППТ) и «Feralpi Riesa» (130-тонная ДСП), а также в Корее на «Hyundai Steel» (90-тонная ДСП) и обеспечивает выработку в среднем 80 кВт·ч/т стали [15].

Термохимическая регенерация (ТХР) природного газа. ТХР заключается в получении смеси СО и H_2 , обладающей большей теплотворностью, чем

CH_4 , за счет физической теплоты и химической энергии CO_2 и H_2O , содержащихся в ПГС. Применительно к ДСП ТХР может быть реализована только в процессах с непрерывной загрузкой шихты в ванну, отличающихся относительным постоянством состава и температуры ПГС по ходу плавки, и использована для ПН скрапа на конвейере с помощью ТКГ. Согласно расчетам [16], ТХР повышает тепловой к. п. д. печи на 5...6 % при снижении расхода природного газа на 21 % и эмиссии CO_2 на 9 % в сравнении с прямым сжиганием природного газа в ТКГ.

Диверсификация энергообеспечения. Представляет интерес использование первичных источников энергии наряду с электроэнергией в ДСП, учитывая опыт 1980–1990-х гг. [3] и снижение мировых цен на природный газ. Компанией «SMS Siemag» (Германия) разработана концепция процесса производства стали с непрерывной загрузкой шихты и периодическим выпуском [17]. Скрап в реакторе нагревают и расплавляют с помощью первичных источников энергии, вводя около 70 % необходимой энергии. Затем углеродистый полупродукт перетекает в ванну ДСП с относительно маломощной электроустановкой, где его доводят до заданной марки стали. Себестоимость стали снижается на 7,5 евро/т (в условиях ЕС), а эмиссия CO_2 уменьшается на 30 % в сравнении с лучшими показателями эксплуатации ДСП. В процессе «EcoArc» при нагреве скрапа активно используют энергию окисления углерода, поступающего из шихты и инжестируемого в ванну. По опыту работы шести агрегатов в странах Азии, доля электроэнергии в приходной части энергетического баланса не превышает 40 %.

Разработки российских специалистов [18] направлены на преобразование ДСП в топливно-дуговую печь FAF (fuel arc furnace), в энергобалансе которой уменьшена доля электроэнергии и увеличена, соответственно, доля топливной составляющей. Принцип FAF может быть реализован в ДСП с дискретным и с непрерывным процессом. Ожидается, что производительность и энергоэффективность FAF будет выше, чем современных ДСП серии «Ultimate» компании «Siemens-VAI» (Германия), а общая эмиссия CO_2 в атмосферу ниже, чем ДСП с учетом вклада питающей печь ТЭС.

Таким образом, ряд концептуальных и технологических решений ДСП, разработанных в свете современных энергоэкологических тенденций, находится в стадии промышленного опробования и выхода на мировой рынок. Однако ожидаемая цена их будет высокой. Поэтому с учетом экономической ситуации применение новых решений

в отечественном электросталеплавильном производстве, которое, безусловно, нуждается в эффективной модернизации, проблематично.

Энергоэффективные решения при модернизации ДСП. Для снижения и утилизации потерь энергии с ПГС, охлаждающей водой и плавильной пылью, предлагается комплекс относительно малозатратных решений для новых и модернизируемых ДСП, используемых как в «большой», так и «малой» металлургии, приведенный на рис. 1.

Они включают: совершенствование геометрии ванны, энергосберегающие водоохлаждаемые панели с пространственной структурой, системы рассредоточенной аспирации и среднетемпературного предварительного нагрева скрапа.

Совершенствование геометрии ванны. Применение в «большой» металлургии интенсивной двухстадийной технологии электроплавки приблизило происходящие в ванне процессы к условиям конвертерного процесса, однако отношение диаметра к глубине ванны D_b/H_b (см. рис. 1) в ДСП по-прежнему составляет в среднем 5,0...5,5 [19], тогда как в конвертере оно близко к 1. Снижение в современных ДСП критичности величины удель-

ной поверхности контакта шлак–металл (есть внепечная обработка) и стойкости футеровки стен (используются водоохлаждаемые панели) позволяет скорректировать геометрию ванны, увеличив ее глубину при данном объеме, с целью снижения потерь энергии излучающей поверхностью расплава и интенсификации процессов тепло- и массообмена. При этом принимается во внимание ряд конструктивно-технологических ограничений, связанных с диаметром распада электродов D_p и энерготехнологическим режимом ДСП (ток переменный или постоянный, процесс дискретный или непрерывный).

На основе математической модели излучения в рабочем пространстве ДСП, адаптированной для исследования влияния геометрии ванны [20], выполнен анализ относительных потерь энергии с водой от D_b/H_b для 120-тонной высокопроизводительной дуговой печи с различными энерготехнологическими режимами (рис. 2).

Минимум потерь теплоты на расчетных кривых связан с усилением влияния поверхности электродов в общей мощности излучения при уменьшении D_b/H_b . Согласно данным рис. 2 в рассмотренных вариантах энерготехнологических режимов

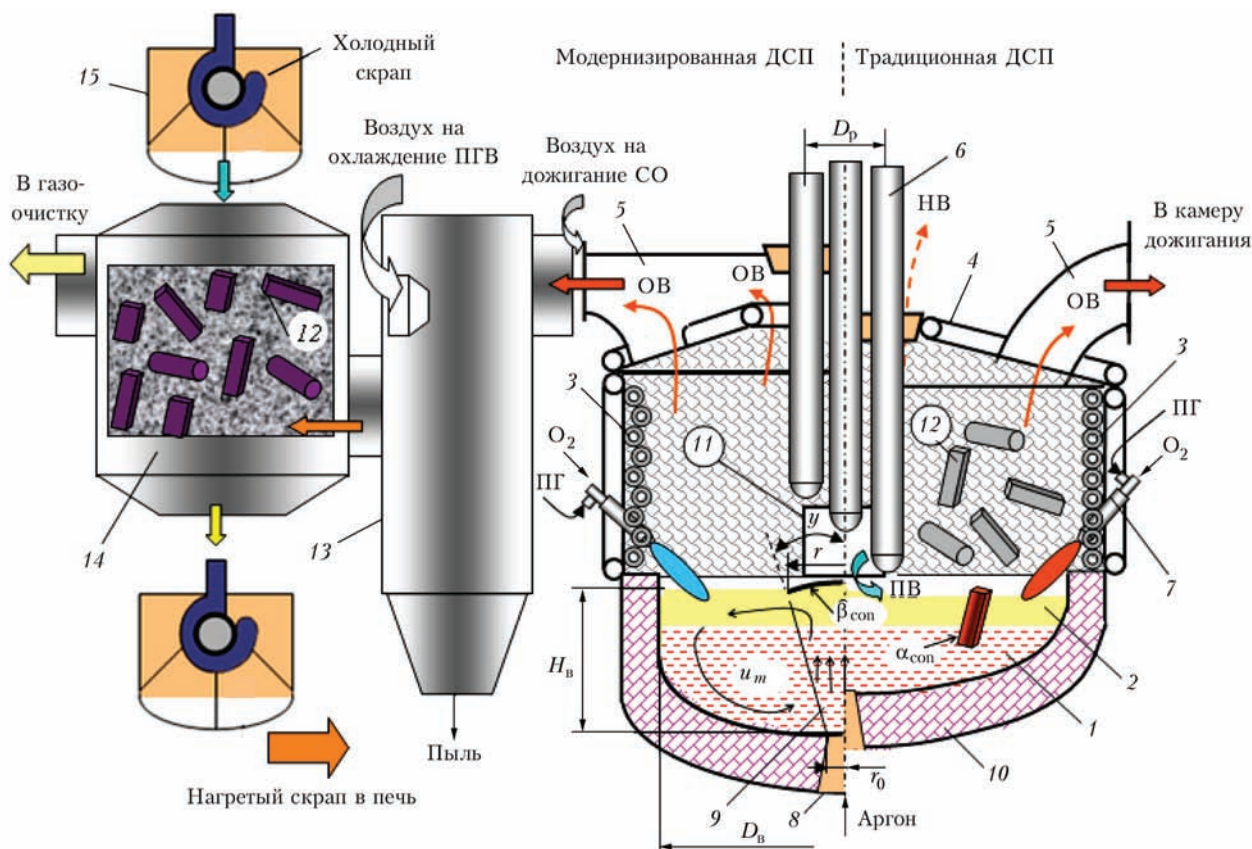


Рис. 1. Комплекс энергоэффективных решений для ДСП: 1 — ванна металла; 2 — ванна шлака; 3 — стеновые панели; 4 — свод; 5 — газоотводящий патрубок; 6 — электроды; 7 — комбинированная фурма-горелка; 8 — пористая пробка; 9 — двухфазная газометаллическая область; 10 — подина; 11 — рабочее окно; 12 — скрап; 13 — камера дожигания и пылеосаждения; 14 — камера нагрева скрапа; 15 — загрузочная бадья; ОВ, НВ — организованные и неорганизованные пылегазовые выбросы; ПВ — приток воздуха; ПГ — природный газ. Другие обозначения — см. в тексте

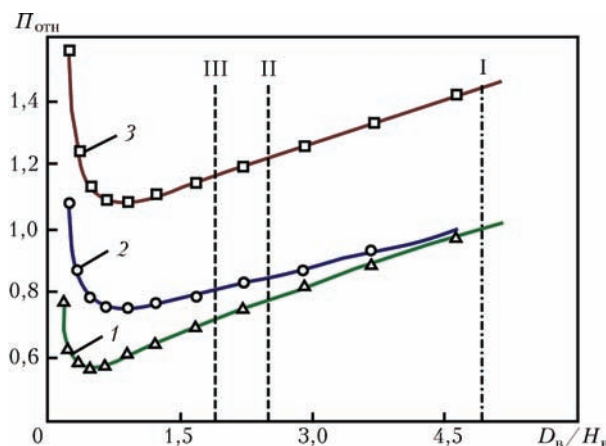


Рис. 2. Относительные потери теплоты излучением в 120-тонной ДСП ($P_{отн}$) в зависимости от $D_в/H_в$: 1 — ДСППТ, дискретный процесс; 2 — ДСП, периодический процесс; 3 — ДСП, непрерывный процесс; 1 — $D_в/H_в$ для стандартной ванны; ограничение $D_в/H_в$ для 1, 2 (II) и 3 (III) соответственно

1, 2, 3 достигается сокращение потерь теплоты с водой относительно стандартной ванны с $D_в/H_в = 5$ на 21, 26 и 27 % соответственно.

В современных ДСП уменьшение поверхности металл–шлак компенсируется увеличением скорости циркуляции в ванне за счет гидродинамического воздействия кислородных фурм и продувки инертным газом через пористые пробки в подине.

Применительно к продувке жидкой стали инертным газом движущей силой циркуляции является разность плотностей окружающего металла и двухфазной газометаллической области, образующейся с углом раскрытия γ в ванне над пористой пробкой (см. рис. 1). Тепло- и массообмен в перемешиваемой сталеплавильной ванне, согласно исследованиям [21], описывается следующими критериальными уравнениями:

$$Nu = 0,017Re^{0,8}Pr^{0,33}, \quad (1)$$

$$Sh = 0,079Re^{0,7}Sc^{0,356}, \quad (2)$$

где $Nu = \alpha_{con} H_в / \lambda$ — число Нуссельта; α_{con} — коэффициент теплопереноса в жидкой ванне к фрагменту скрапа; λ — коэффициент теплопрово-

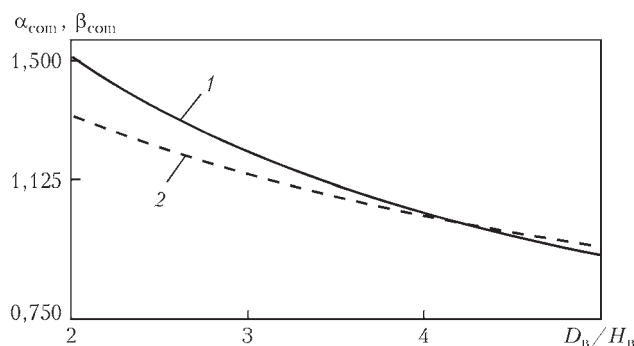


Рис. 3. Зависимость относительных коэффициентов теплопереноса α_{con} (1) и массопереноса β_{con} (2) от $D_в/H_в$

дности жидкой стали; $Re = u_m H_в / \nu$ — число Рейнольдса; u_m — средняя скорость циркуляции в ванне; ν — кинематическая вязкость жидкой стали; $Pr = \rho C_v / \lambda$ — число Прандтля; C — теплоемкость жидкой стали; $Sh = \beta_{con} H_в / D$ — число Шервуда; β_{con} , D — коэффициенты массопереноса и диффузии реагента в ванне соответственно; $Sc = \nu / D$ — число Шмидта.

Средняя скорость циркуляции в ванне при пневматическом перемешивании u_m является, согласно данным работы [22], функцией геометрии ванны ($D_в/H_в$) и расхода газа Q через донную пористую пробку:

$$u_m = 0,79Q^{0,33}H_в^{0,25} / (0,5D_в)^{0,67}. \quad (3)$$

Кинетика плавления фрагментов скрапа в перемешиваемой ванне определяется теплофизическими характеристиками, удельной поверхностью и коэффициентом конвективной теплоотдачи в ванне α_{con} [23]. Кинетика рафинирования стали от вредных примесей (серы, фосфора) характеризуется коэффициентом конвективного массопереноса β_{con} и величиной активной межфазной поверхности барботажного «пятна» радиусом r (см. рис. 1). Результаты оценки α_{con} и β_{con} относительно их значений для базовой ванны при изменении $D_в/H_в$, выполненные на основе зависимостей (1–3), приведены на рис. 3. Согласно расчетам снижение $D_в/H_в$ с 5 до 2,5 ведет к росту α_{con} на 16 и β_{con} на 11 %.

По экспериментальным данным [23], существует пропорциональная зависимость между α_{con} и скоростью плавления скрапа в жидкой ванне. Увеличение β_{con} и активной реакционной поверхности в глубокой ванне способствует интенсификации массообмена и рафинирования на границе раздела металл–шлак. Увеличение глубины ванны согласно эмпирической зависимости влияния мощности пневматического перемешивания на продолжительность усреднения сталеплавильной ванны [24] способствует сокращению времени гомогенизации жидкого расплава на 8...10 %.

Согласно оценкам [25] в условиях ДСППТ при перемешивании расплава электровихревыми течениями влияние глубины ванны на процессы тепло- и массообмена более существенно, чем в ДСП с пневматическим перемешиванием ванны. Снижение $D_в/H_в$ с 5,0 до 2,5 ведет к росту α_{con} не менее чем вдвое.

Расчетные показатели энергоэффективности, достигаемые за счет совершенствования геометрии ванны, для 120-тонной высокопроизводительной дуговой печи при реализации различных энерготехнологических режимов приведены в табл. 2.

Энергосберегающие водоохлаждаемые панели с пространственной структурой. Традиционные панели ДСП выполнены с плотной структурой труб (рис. 4, а), которая не обеспечивает эффективного роста толщины шлакового гарнисажа.

Для энергосберегающих панелей (рис. 4, б–г) характерна пространственная структура, способствующая накоплению возобновляемого равновесного слоя гарнисажа, который воспринимает лучистый тепловой поток и выполняет теплоизоляционную и теплоаккумулирующую функции [26].

Задача стационарного теплообмена в системе источники излучения–трубчатая панель с водяным охлаждением, покрытой слоем гарнисажа описывается уравнением:

$$q - (1 - \epsilon)\sigma T_1^4 - \frac{(T_1 - T_2)}{(h_1/\lambda_1 + h_2/\lambda_2 + 1/\alpha)} = 0,$$

(4)

где σ — постоянная Стефана–Больцмана; q — падающий тепловой поток; ϵ — степень черноты панели; α — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к воде; $h_1, \lambda_1, h_2, \lambda_2$ — толщины и теплопроводности гарнисажа и трубы соответственно; T_1, T_2 — температура поверхности излучения и воды соответственно.

Результаты численного решения уравнения (4) в двумерной постановке в пакете ELCUT 6,2 для панелей, выполненных по вариантам на рис. 4, а, б, приведены на рис. 5, а, б в виде температурного поля (стрелки указывают распределение теплового потока). Интегральная характеристика относительных потерь теплоты с водой показана на рис. 5, в. Согласно проведенным данным оптимальное значение межтрубного расстояния f , при котором потери минимальны, составляет 1,8...1,9 диаметра трубы d .

Таблица 2. Расчетные параметры энергоэффективности 120-тонной дуговой печи с глубокой ванной относительно базового варианта

Параметры	Базовый вариант ванны ДСП	Значения параметров		
		ДСП, периодический процесс	ДСПТ, дискретный процесс	ДСП, непрерывный процесс
D_v/H_v	5,0	2,75	2,75	1,90
Потери теплоты с водой	1,0	0,79	0,74	0,73
Продолжительность усреднения ванны	1,0	0,94	0,92	0,90
Скорость плавления скрапа в ванне	1,0	1,19	1,7...2,0	1,25

Рабочие характеристики водоохлаждаемых панелей ДСП традиционных и энергосберегающих с объемной структурой приведены в табл. 3.

Следует отметить, что двухрядные панели (рис. 4, в) [26], несмотря на повышенную металлоемкость, обеспечивают помимо энергосбережения высокую надежность, ремонтпригодность и повышенный срок службы внешнего ряда. При выходе из строя внутреннего разреженного ряда из-за прожога дугой печь может работать до ближайшего капремонта на внешнем ряде панели.

Для ДСП литейного класса вместимостью 3...15 т разработано и внедрено инновационное решение комбинированного свода, сочетающее водоохлаждаемые элементы и огнеупорную футеровку (рис. 6). Комбинированный свод позволяет при минимальных потерях теплоты с водой сократить и удельный расход огнеупоров за счет замены их водоохлаждаемыми элементами в центральной части, обычно лимитирующей стойкость свода в целом.

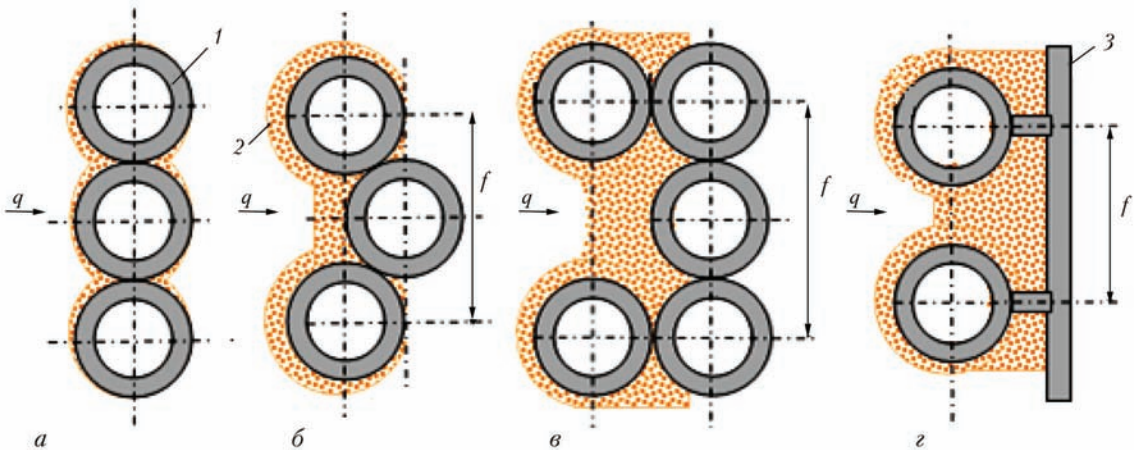


Рис. 4. Водоохлаждаемые панели ДСП: 1 — труба; 2 — гарнисаж; 3 — кожух печи; q — направление падающего теплового потока (обозн. см. в тексте)

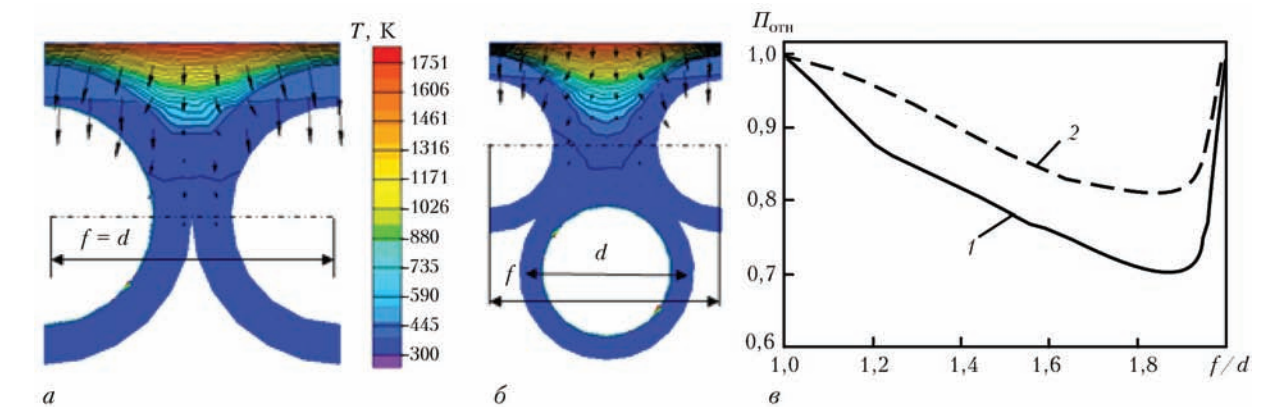


Рис. 5. Температурное поле в панели традиционной (а), с пространственной структурой (б) и относительные потери теплоты на 1 м² панели ($\Pi_{отн}$) в зависимости от параметра f/d : 1, 2 — теплопроводность гарнисажа 2 и 8 Вт/(м·К) соответственно (обозн. см. в тексте)

Т а б л и ц а 3. Рабочие характеристики водоохлаждаемых панелей				
Параметр	Значения параметров относительно варианта (а) для панелей по вариантам (б–г) (см. рис. 4)			
	а	б	в	г
Масса гарнисажа на 1 м ²	1,0	1,22	2,33	2,20
Тепловой поток к воде на 1 м ²	1,0	0,84	0,80	0,77
Масса панели на 1 м ²	1,0	1,08	1,52	0,73
Область применения	Традиционное решение для ДСП	ДСП средней мощности (до 0,7 МВА/т) и вместимости (до 50 т)	Крупные ДСП высокой мощности (> 0,7 МВА/т)	ДСП малой вместимости и мощности (до 0,5 МВА/т)

При этом повышается стойкость периферийной части, что существенно улучшает технико-экономические показатели комбинированного свода [27].

Система рассредоточенной аспирации. В данном решении реализованы принципы рассредоточения всасывающей поверхности и приближения ее к электродным зазорам с целью снижения неорганизованных выбросов ПГС и уменьшения притока воздуха [28]. Конструктивно система выполнена в виде сводовой камеры с горизонтальным газоотводящим патрубком, соединенным дополнительным каналом с периферией подсводового пространства (см. рис. 1).

Предварительный анализ показал, что течение среды в исследуемом объекте является турбулентным ($Re = 10^5$). Численное моделирование выполняли на основе уравнений Навье–Стокса (5) и неразрывности (6) с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности в пакете прикладных программ CosmosFloWorks:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} + (\nabla \vec{w}) \vec{w} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \nabla^2 \vec{w} + F, \tag{5}$$

$$\text{div} \vec{w} = 0, \tag{6}$$

где ρ — плотность; w — скорость; p — давление; τ — время; F — объемная плотность сил; η — динамическая вязкость среды.

Расчет поля скоростей, давлений и температур газового потока в модели 120-тонной ДСП выполняли при следующих допущениях и граничных условиях, принятых в модели [28]: рассматривали период плавления; в качестве рабочего газа принят воздух; теплообмен газа с элементами рабочего пространства отсутствовал; в выходном сечении газоотводящего патрубка разрежение составляло 15 Па, средняя температура отходящих газов равнялась 1000 К; в сечении рабочего окна нормальные условия (атмосферное давление и температура

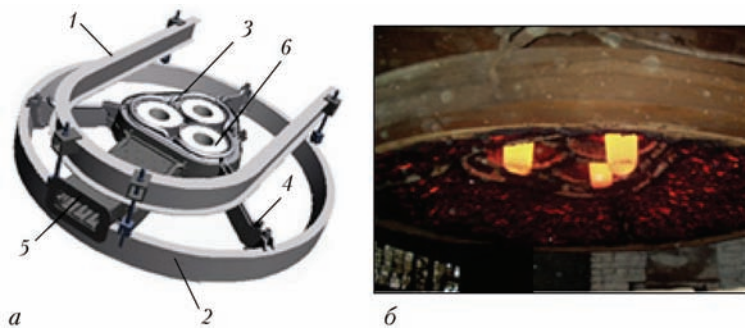


Рис. 6. Комбинированный свод ДСП: концептуальное решение (а) и реализация (б); 1 — портал печи; 2 — опорное кольцо свода; 3 — центральная водоохлаждаемая часть; 4 — опорные спицы; 5 — газоотводящий патрубок; 6 — огнеупорная вставка

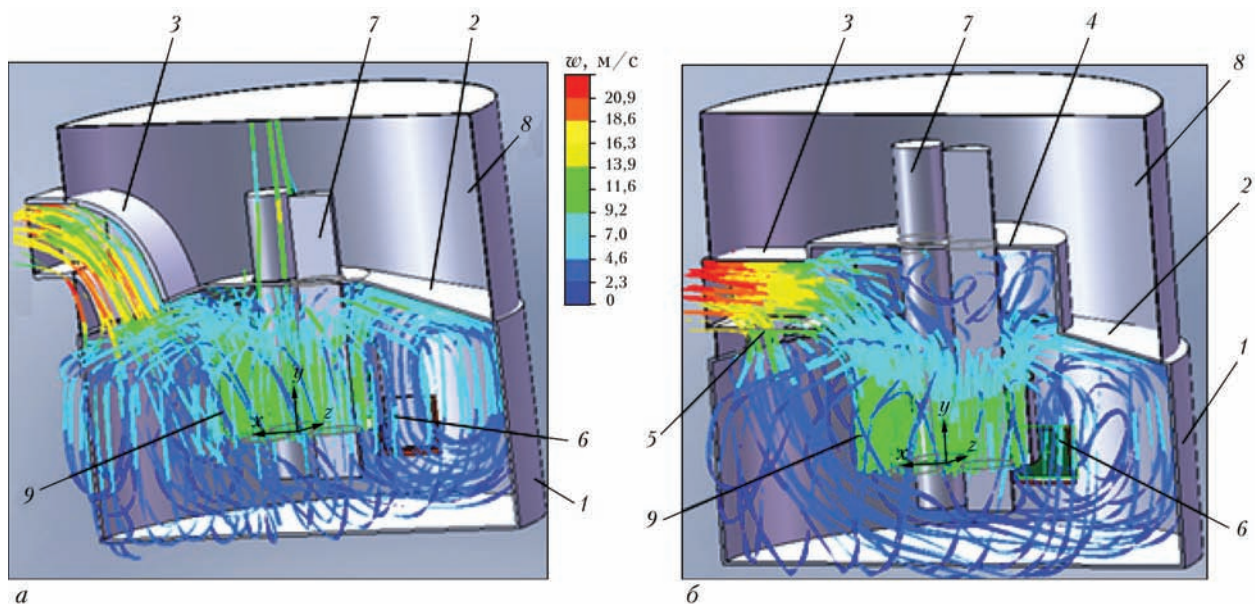


Рис. 7. Результаты расчета поля скоростей пылегазовой среды и треков частиц пыли для традиционной системы аспирации (а) и системы рассредоточенной аспирации (б) в период плавания: 1 — корпус печи; 2 — свод; 3 — газоотводящий патрубок; 4 — сводовая камера; 5 — периферийный канал; 6 — рабочее окно; 7 — электрод; 8 — условная камера; 9 — колодец, образованный дугами в шихте при плавнении

газа 293 К); на поверхности условной камеры над печью атмосферное давление и температура газа 293 К; на дне проплавляемого дугами в шихте колодца интенсивность газообразования 4,5 кг/с при температуре газа 1850 К и атмосферном давлении; ширина электродных зазоров 30 мм; на других поверхностях — реальная стенка.

На полученные результаты расчета поля скоростей накладывали поток частиц плавильной пыли, генерируемый условным источником ПГС на дне колодца. Принятые в численной модели параметры пылевыведения следующие: интенсивность 0,2 кг/с, средний размер частиц 100 мкм, плотность 3 г/см³ и соответствуют данным работы [29]. Число условных частиц пыли в зоне образования принято равным 100. Скорость и температура частиц пыли в численной модели привязаны к расчетным параметрам газового потока.

Результаты расчетов в виде поля скоростей с наложенными на него треками частиц плавильной пыли приведены на рис. 7. Общая картина газодинамики в рабочем пространстве печи свидетельствует о более эффективной локализации неорганизованных выбросов при использовании рассредоточенной системы газоудаления, что видно по числу треков частиц пыли, проходящих через электродные зазоры в пространство условной камеры над сводом.

Интегральные характеристики систем аспирации, полученные в результате численного моделирования, сопоставлены в табл. 4.

Результаты расчетов показывают, что система рассредоточенной аспирации в исследуемом диапазоне изменения режимных и геометрических параметров ДСП обеспечивает преимущества над традиционной системой газоудаления по энергоэффективности и экологической безопасности. Относительные величины притока холодного воздуха в печь через рабочее окно и неорганизованных выбросов через электродные зазоры снижаются в среднем на 22 и 35 % соответственно и практически подавляется вынос плавильной пыли в электродные зазоры.

Система среднетемпературного предварительного нагрева скрапа. С учетом отмеченных ранее недостатков конструктивного решения [14], в предлагаемой для мини-заводов системе предварительный нагрев скрапа производится в специальной камере, установленной в тракте газоудаления с последующей перегрузкой в бадью для завалки в печь.

Таблица 4. Сравнительная характеристика систем аспирации ДСП				
Система аспирации	Параметры, отн. ед.			
	Приток воздуха в рабочее окно	Неорганизованные выбросы		Общий расход газа из печи
		газа	пыли	
Традиционная	1	1	1	1
Рассредоточенная	0,78	0,65	Не наблюдали	0,86

Таблица 5. Сопоставительная характеристика основных вариантов ПН скрапа			
ПН скрапа	Высокотемпературный		Среднетемпературный в камере
	в шахте	на конвейере	
Температура нагрева, °С	850...950	600...700	300
Расчетная экономия энергии в ДСП, кВт·ч/т	100...120	70...105	22...25
Проблема выделения PCDD/F	Существует		Нет
Энергозатраты на нейтрализацию PCDD/F	Не менее 10...15 кВт·ч/т [8]		Нет
Изменение инфраструктуры цеха	Существенное		Незначительное
Дополнительные требования к подготовке скрапа	Требуется фрагментирование		Нет
Влияние ПН скрапа на дожигание СО	Негативное из-за снижения температуры газа в слое холодного скрапа		Дожигание СО проводят до ПН скрапа

Предварительные расчеты [28], выполненные на основе численного решения задачи Шумана, показывают возможность нагрева 50 % общей массы скрапа стандартной насыпной плотностью 0,9 т/м³ до 400 °С за 22...25 мин при обработке потоком ПГС подвалки 50-тонной ДСП в специальной камере. Согласно расчетам это позволяет без существенной реконструкции производства снизить энергозатраты при выплавке полупродукта на 22...25 кВт·ч/т и вписаться в существующий энерготехнологический режим печи.

Схема организации предварительного нагрева скрапа в существующей инфраструктуре комплекса ДСП приведена на рис. 1. Камера нагрева скрапа устанавливается в тракте газоудаления после камеры дожигания и пылесосаждения. Загрузка в камеру и последующая выгрузка нагретого скрапа производится посредством используемых в цехе загрузочных бадей, мостовых кранов и передаточных тележек. Для обеспечения максимальной степени дожигания СО в предложенной технологической схеме охлаждение газовой смеси принято двухстадийным. На первой стадии приток воздуха в зазор камеры дожигания и газоотводящего патрубка печи близок к стехиометрическому, что обеспечивает высокую температуру при дожигании. На второй стадии осуществляют основную часть притока воздуха, обеспечивая температуру газовой смеси не выше 450 °С по условиям среднетемпературного нагрева скрапа.

Сопоставительная характеристика вариантов ПН скрапа приведена в табл. 5.

Анализ данных показывает, что среднетемпературный ПН скрапа, учитывая проблему PCDD/F и весьма затратные методы ее решения, представляется рациональным решением при модернизации действующих мини-заводов Украины, в которых установлены ДСП с бадьевой загрузкой скрапа.

В данной работе предложены решения модернизации ДСП на основе изменения геометрии ван-

ны в сторону увеличения ее глубины, энергосберегающих водоохлаждаемых элементов, системы рассредоточенной аспирации и среднетемпературного предварительного нагрева скрапа. Оценка экономии электроэнергии для комплекса решений применительно к 12-тонной ДСП составляет 56...68 кВт·ч/т, срок окупаемости 0,5...1,3 года. Кроме энергосбережения предложенные решения снижают неорганизованные пылегазовые выбросы на 35 %, повышают эффективность дожигания СО и не вызывают эмиссии токсичных PCDD/F.

Список литературы/References

1. Morfeldt, J., Nijs, W., Silveira, S. (2015) The impact of climate targets on future steel production — an analysis based on global energy system model. *J. of Cleaner Production*, **103**, 469–482.
2. (2016) *Global steel report*. US Department of Commerce. International Trade Administration. July 2016. <http://trade.gov/steel/pdfs/07192016global-monitor-report.pdf>
3. Toulouevski, Yu., Zinurov, I. (2010) *Innovation in electric arc furnaces. Scientific basis for selection*. Berlin, Germany, Springer-Verlag.
4. Stovpchenko, G., Projdak, Yu., Kamkina, L. et al. (2008) Low carbon steel manufacture in EAF steelmaking shop. *Archives of Metallurgy and Materials*, **53**(2).
5. Kuhn, R. (2005) Continuous off-gas measurement and energy balance in electric arc steelmaking. *ISIJ Int.*, **25**(11), 1587–1596.
6. Zuccato *Energia Company Presentation*. <http://www.zuccatoenergia.it/index.php/en> (assessed 11.04.18).
7. Grant, M. (2000) Principles and strategy of EAF post-combustion. In: *Proc. of 58-th Electric Furnace Conf.* (Orlando, USA, November 12–15th).
8. Toulouevski, Yu., Zinurov, I. (2015) *Electric arc furnace with flat bath. Achievements and prospects*. Springer, Heidelberg–New York–Dordrecht–London.
9. Lehner, J., Friedacher, A., Gould, L., Fingerhut, W. (2004) Low-cost solutions for the removal of dioxin from EAF off-gas. *La Metallurgia Italiana*, **4**, 67–70.
10. Nagai, T., Sato, Y., Kato, H. et al. (2015) The most advanced power saving technology in EAF. *Introduction to EcoArc*. <https://steelplantech.com/wp-content/uploads/2015/07/The-most-advanced-power-saving-technology-in-EAF-Introduction-to-ECOARC.pdf>
11. *Eco — friendly and efficient: COSS furnace — continuously optimized shaft system*. <http://www.fuchs-technology.net/en/fulfillment/furnace-systems/coss-furnace.html> (assessed 30.09.2017).

12. Rummler, K., Tunaboylu, A., Ertas, D. (2001) Scrap preheating and continuous charging system for EAF meltshop. *MPT Int.*, **5**, 32–36.
13. Abel, M., Hein, M., Huber, H.-J. (2015) EAF quantum. The future approach to efficient scrap melting. *Steelworld*, June, 91–94. <http://steelworld.com/newsletter/2015/June15/Technology0615-2.pdf>
14. Gottardi, R., Miani, S., Partyka, A., Engin, B. (2008) UH-CP-Elektrolichtbogenofen erreicht Produktionsrate von 320 t-h. *Stahl und Eisen*, **128**(8), 19–24 (in German).
15. Dorndorf, M., Liese, M., Granderath, R., Schrade, C. (2016) High efficient energy recovery solutions for melt shops. *La Metallurgia Italiana*, **9**, 24–31.
16. Gubynsky, M.V., Tymoshenko, S.M., Shrajber, O.A., Antonets, I.V. (2017) Increase in energy efficiency of electric steelmaking processes by conversion of natural gas with arc furnace waste gases. *Problemy Naukovoї Energetyky: Transact.*, **48**(1), 60–66 [in Ukrainian].
17. Falkenreck, U., Weischedel, W. (2007) New scrap-based steelmaking process predominantly using primary energy. *MPT Int.*, **3**, 52–55.
18. Tuluevsky, Yu.N., Zinurov, I.Yu., Shver, V.G. (2011) New possibilities of Consteel furnaces. *Elektrometallurgiya*, **6**, 22–27 [in Russian].
19. Egorov, A.V. (1990) Calculation of power and parameters of electric furnaces of ferrous metallurgy. In: *Manual for higher education institutions*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
20. Timoshenko, S. N. (2016) Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. *Sistemye Tekhnologii*, **3**, 33–39 [in Russian].
21. Kawakami, M., Takatani, R., Brabie, L. (1999) Heat and mass transfer analysis of scrap melting in steel bath. *Tetsu to Hagane*, **85**(9), 658–665.
22. Mazumdar, D., Guthrie, R. (1995) The physical and mathematical modeling of gas stirred ladle systems. *ISIJ Int.*, **35**(1), 1–20.
23. Li, J., Provatas, N. (2008) Kinetics of scrap melting in liquid steel: Multipiece scrap melting. *Metallurg. and Mater. Transact.*, **39B**(4), 268–279.
24. Nakanishi, K., Fujii, T., Szekely, J. (1975) Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel processing operations. *Ironmaking & Steelmaking*, **3**, 193–194.
25. Timoshenko, S.N., Gubinsky, M.V. (2016) Increase in energy efficiency of steelmaking process with continuous melting of charge in liquid bath. *Tekhnichna Teplofizyka ta Promyslova Teploenergetyka*, **8**, 174–183 [in Russian].
26. Timoshenko, S. N. (2017) Analysis of energy efficient solutions of a small capacity electric arc furnace and their synthesis in a new generation 15-ton unit. *Suchasni Problemy Metallurgii*, **20**, 78–87 [in Ukrainian].
27. Doroshenko, A.V., Dyadkov, B.P., Timoshenko, S.N., Tishchenko, P.I. (2017) Combined water-cooled electric furnace roof of small capacity. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **5**, 91–95 [in Russian].
28. Timoshenko, N.S., Semko, A.N., Timoshenko, S.N. (2013) Modeling of energy-saving solutions for outgassing from arc steelmaking furnace. *Naukovi Pratsi DNTU. Seriya Metallurgiya*, 84–95 [in Russian].
29. Guézennec, A.G., Huber, J.C., Patisson, F.R. et al. (2004) Dust formation by bubble-burst phenomenon at the surface of a liquid steel bath. *ISIJ Int.*, **44**(8), 1328–1333.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

С. М. Тимошенко¹, Г. П. Стовпченко^{2,3}, Ю. В. Костецький², М. В. Губинський⁴

¹Донецький національний технічний університет.

85300, Донецька область, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2. E-mail: mail@donntu.edu.ua

²Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

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

³Інжинірингова компанія «Елмет-Рол».

03150, м. Київ, А.с. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

⁴Національна металургійна академія України.

49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Запропоновано комплекс маловитратних енергоефективних рішень щодо модернізації дугових сталеплавильних печей: глибока ванна, водоохолоджувані панелі з просторовою структурою, система розосередженої аспірації і попередній середньотемпературний нагрів скрапу пилогазовим середовищем з ефективним допалюванням СО. Методами комп'ютерного моделювання показано, що застосування комплексу запропонованих рішень у 120-тонній дуговій сталеплавильній печі дозволяє скоротити енергоспоживання на 56...68 кВт·г/т. Бібліогр. 29, табл. 6, іл. 7.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч; енергоефективність; глибока ванна; водоохолоджувані елементи з об'ємною структурою; система розосередженої аспірації; середньотемпературний попередній нагрів скрапу

WAYS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC ARC FURNACES

S.N. Timoshenko¹, A.P. Stovpchenko^{2,3}, Yu.V. Kostetsky², M.V. Gubinsky⁴

¹Donetsk National Technical University.

2 Shybankova Sq., 85300, Pokrovsk, Donetsk region, Ukraine. E-mail: mail@donntu.edu.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

³Engineering company «Elmet-Roll».

P.B. 259, 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

⁴National Metallurgical Academy of Ukraine.

4 Gagarina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

A complex of low-cost energy-efficient solutions for the modernization of electric arc furnaces was proposed: a deep pool, water-cooled panels with a spatial structure, a system of distributed aspiration and preliminary medium-temperature heating of a scrap by a powder-gas environment with an efficient extra burning of CO. Applying the methods of computer simulation, it was shown that using a complex of solutions in a 120-ton electric arc furnace can reduce energy consumption by 56...68 kW·h/t. Ref. 29, Tabl. 6, Fig. 7.

Key words: *electric arc furnace; energy efficiency; deep pool; water-cooled elements with volumetric structure; distributed aspiration system; medium temperature preheating of scrap*

Поступила 16.04.2018

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА «АЗОВСТАЛЬ»



Металлургический комбинат «Азовсталь» Группы Метинвест инвестирует почти полмиллиарда гривен в модернизацию систем экологической защиты и охлаждения доменной печи №4. Предприятие поэтапно переходит на замкнутый цикл водоснабжения доменного производства.

В 2014–2016 гг. доменная печь №4 прошла реконструкцию. Были построены двухуровневые крытые литейные дворы с современной системой отвода и утилизации дымовых газов. «Азовсталь» продолжает модернизацию печи для повышения ее экологичности и энергоэффективности.

В ходе капитального ремонта будет заменена футеровка (термостойкая оболочка) печи, построена новая система охлаждения и комплекс химической очистки воды. Замена чугунных элементов термозащиты (холодильных плит) на медные и новая испарительная система охлаждения позволит перейти на обратное водоснабжение. Таким образом, предприятие полностью откажется от использования морской воды для охлаждения печи.

Ремонт позволит сделать печь еще безопаснее для экологии. Для улучшения герметичности и предотвращения неорганизованных выбросов пыли заменят газоуплотнительный клапан загрузочного устройства. Будет выполнена ревизия системы аспирации подбункерного помещения, очистка газоходов и установка новых циклонов (<https://www.azovpromstal.com>).

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ»

5–6 декабря 2018 г. в Киеве в конференц-центре «ДЕПО» прошла Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее», организованная Национальной академией наук Украины, Институтом электросварки им. Е. О. Патона, Международным институтом сварки и Международной Ассоциацией «Сварка». Конференция посвящена 100-летию юбилею Национальной академии наук Украины. В ней приняли участие свыше 200 представителей академических институтов, отраслевых НИИ, университетов, научных, проектно-конструкторских и инженерных центров, промышленных и коммерческих предприятий, руководителей и менеджеров бизнес-структур и др. В числе участников конференции зарубежные ученые из Австрии, Болгарии, Великобритании, Германии, Грузии, Израиля, Казахстана, Канады, КНР, Польши, Словакии, Швейцарии. Среди почетных гостей конференции — Исполнительный директор Международного института сварки г-жа Сесиль Мейер.

Началу работы конференции предшествовали приветствия музыкального коллектива струнного ансамбля «Киевские солисты», вице-президента НАН Украины академика А. Г. Наумовца и президента Академии наук провинции Гуандун (Китай) г-на Ляо Бина.

На пленарных заседаниях заслушаны и обсуждены 18 докладов о наиболее важных научных и прикладных достижениях, полученных в последние годы в области сварки и родственных технологий, а также перспективном развитии этих направлений.

Среди докладчиков такие известные ученые, как Ляо Бин (Китай), У. Райсген (Германия), А. Пиетрас (Польша), Л. Гельман (Великобритания), Ш. Кайтель (Германия), Я. Клейман (Канада), М. Белоев (Болгария), Н. Енциггер (Австрия), Ф. Коленич (Словакия), а также С. И. Кучук-Яценко, Л. М. Лобанов, И. В. Кривцун, В. В. Квасницкий, И. С. Гах, З. Т. Назарчук, В. М. Нестеренков, С. В. Ахонин (Украина).

Пленарный доклад Б. Е. Патона «Современные достижения и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в об-





ласти сварки и родственных технологий» был представлен Л. М. Лобановым.

Параллельно с основными докладами конференции на секции «Сварка и родственные технологии» заслушаны доклады молодых специалистов.

6 декабря в читальном зале библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона были представлены свыше 150 стендовых докладов. Экспозиция включала следующие разделы:

- технологии, материалы и оборудование для сварки и родственных технологий (52 доклада);
- прочность, напряженно-деформированное состояние, неразрушающий контроль, техническая диагностика (30 докладов);
- инженерия поверхности (28 докладов);
- экология, сварка в медицине, новые материалы, аттестация и стандартизация сварочного производства (15 докладов);
- секция молодых специалистов (27 докладов).

Обмен мнениями при обсуждении научной информации был взаимно полезен.

К началу работы конференции были изданы планарные доклады в виде спаренных выпусков журнала «Автоматическая сварка» (№ 11–12, 2018 г.) и «The Paton Welding Journal» (№ 11–12, 2018 г.), а также Сборник тезисов стендовых докладов.

Во время работы конференции ее участники смогли ознакомиться с обновленной экспозицией демонстрационного зала ИЭС им. Е. О. Патона.

6 декабря состоялся также XX Совет Международной Ассоциации «Сварка», на котором обсуждались результаты работы Ассоциации за отчетный период и направление работ на перспективу. Решением Совета МАС продлены полномочия Президента Совета МАС академика Б. Е. Патона и директора МАС канд. физ.-мат. наук А. Т. Зельниченко до 2020 г.

7 декабря для участников конференции из Болгарии и Польши была организована поездка на завод компании «Вита Полис» (г. Боярка, Киевская область), где они ознакомились с производством сварочных проволок из нержавеющей и специальных сталей, ранее не выпускавшихся в Украине. В заключение конференции состоялся дружеский прием для ее участников, который также способствовал установлению научных контактов.

Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее» проведена на высоком уровне благодаря финансовой поддержке многих отечественных компаний и организаций, которым оргкомитет Института электро-сварки им. Е. О. Патона выражает благодарность.

А. Т. Зельниченко, В. Н. Липодаев

НАШІ ВІТАННЯ

ВИТЯГ З УКАЗУ

Президента України № 414/2018

Про відзначення державними нагородами України працівників Національної академії наук України.

За вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, зміцнення науково-технічного потенціалу Української держави, багаторічну плідну працю та з нагоди 100-річчя від заснування Національної академії наук України постановляю:

нагородити орденом
князя Ярослава Мудрого
II ступеня
ПАТОНА
Бориса Євгеновича —
президента НАН України,
академіка



нагородити орденом
князя Ярослава Мудрого
V ступеня
ЛОБАНОВА
Леоніда Михайловича —
академіка-секретаря
Відділення фізико-технічних
проблем матеріалознавства,
академіка НАН України



присвоїти почесне звання
«Заслужений діяч науки
і техніки України»
КРИВЦУНУ
Ігорю Віталійовичу —
заступникові директора
Інституту електрозварювання
імені Є.О. Патона,
академіку НАН України



Президент України
7 грудня 2018 року

П. Порошенко

Колектив Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Современная электрометаллургия» вітають вчених України в галузі зварювання та споріднених технологій з високою відзнакою їх праці.

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Демченко С. А. Влияние структурно-фазового состояния на свойства Al/Ni и Fe/Ni фольг различного функционального назначения. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 «Материаловедение» (13 — Механическая инженерия). — Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, 2018. Дата защиты 20.09.2018.

В работе на примере реакционных многослойных фольг (МФ) Al/Ni и фольг инварных сплавов Fe/Ni, полученных методом электронно-лучевого осаждения (ЭЛО), исследовано влияние размера характерных элементов микроструктуры на свойства функциональных материалов (ФМ) с нестабильной и стабильной исходной структурой. Показано, что для обоих типов исследованных фольг ФМ, изготовленных методом ЭЛО, характерно наличие диапазона размеров микроструктурных элементов, в рамках которого достигается рост уровня их структурно-чувствительных свойств, позволяющий увеличить эффективность их практического применения.

Установлено, что оптимальным сочетанием высоких значений интенсивности теплообразования (не ниже 1,2 кВт/см²) и стабильности значений реакционных параметров (на уровне не ниже 85 % от исходного состояния) в процессе изготовления и старения характеризуются МФ Al/Ni с периодом чередования слоев от 200 до 500 нм.

Показано, что оптимальным сочетанием высокого уровня прочности (микротвердость до 4,5 ГПа) и инварными свойствами, сравнимыми с промышленными инварными сплавами системы Fe–Ni (КТР не выше $1,5...2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в температурном интервале 0...100 °С) характеризуются фольги сплавов Fe–(35...36 мас. %)Ni со структурой γ -фазы и размером элементов микроструктуры в диапазоне значений 50...150 нм.

Как для фольг системы Al–Ni так и для фольг системы Fe–Ni уменьшение размера характерных элементов их микроструктуры ниже определенного уровня ведет к структурно-фазовым превращениям в процессе изготовления, сопровождающиеся формированием дополнительных фаз: метастабильной моноклинной фазы Al₉Ni₂ в фольгах системы Al–Ni и аномально пресыщенного никелем твердого раствора α -(FeNi) в фольгах системы Fe–Ni. Формирования дополнительных метастабильных фаз в процессе изготовления методом ЭЛО фольг с наноразмерной микроструктурой является основным фактором снижения реакционной способности многослойных фольг Al–Ni и потери инварного эффекта фольг системы Fe–Ni.

Полученные результаты были использованы как научные основы разработки технологии изготовления композитных фольг Sn/(Al/Ni)/Sn для реакционной пайки, сочетающих высокую интенсивность теплообразования и стабильность параметров реакции СВС при длительном хранении фольг, и тонких биметаллических фольг (Fe–Ni–Co)/Cu с высоким уровнем прочности и термочувствительности для использования в качестве элементов конструкции миниатюрных терморегуляторов.



Лісова Л. О. Фізико-хімічні процеси при ЕШП та розробка шлаків для підвищення ефективності переплаву високоміцних сталей. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». — Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, 2018. Дата захисту 14.11.2018 р.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей фізико-хімічної взаємодії в системі

газ–шлак–метал при електрошлаковому переплаві. На цій основі розроблено нові шлаки, що здатні покращити енергетичні параметри процесу та якість зливоків з високоміцних марок сталей.

В роботі проаналізовано фізико-хімічні взаємодії та складено модель процесу ЕШП, відповідно до якої маса металу і всієї реагуючої системи газ–шлак–метал збільшуються по мірі розплавлення витратного електроду, а маса шлаку і газу залишається умовно постійними, що дозволяє розраховувати динаміку процесу ЕШП в захисній атмосфері.

Показано, що шлак окиснює активні елементи зі складу металу, що є особливо відчутним на початковому етапі переплаву: при наплавленні 20 мас. % металу (сталь 316L) в шлаку (окисно-фторидні склади) з'являються 0,02...0,05 мас. % MnO та до

0,01 мас. % FeO, вміст яких підвищується до кінця переплаву. Тільки при використанні фторидного шлаку ($\geq 97\%$ CaF₂) вміст цих оксидів в шлаку знижується (після переплаву 40 % металу).

На підставі результатів фізико-хімічного моделювання, експериментальних досліджень властивостей шлакових систем та промислового випробування запропоновано нові склади шлаків:

шлак АНФ-39 (мас. %: 29...35 CaF₂/30...36 Al₂O₃/27...32 CaO/2...4 MgO/1...3 SiO₂) рекомендовано на заміну шлаку АНФ-6 для ЕШП легованих інструментальних сталей в стаціонарних кристалізаторах. Порівняно зі шлаком АНФ-6 новий склад АНФ-39 забезпечує зниження витрат електроенергії в процесі ЕШП (на 15 %) і не чинить суттєвої

окислювальної дії на метал (вміст оксидних неметалевих включень на 0,5 бали нижче);

шлак АНФ-37 (мас. %: 35...40 CaF₂/18...25 Al₂O₃/30...35 CaO/10...16 SiO₂) завдяки достатній кількості двокальцієвого силікату (34...37 мас. % 2CaO·SiO₂) забезпечує самовільне видалення гарнісажу із зовнішніх та внутрішніх поверхонь порожнистих зливків. Цей шлак запропоновано для впровадження на підприємствах, що виготовляють способом ЕШП великокавові труби та оболонки, зокрема для теплової енергетики.

Складено технічні умови на нові склади шлаків: ТУ У 20.5-05416923-112:2015 (АНФ-39) та ТУ У 20.5-05416923-109:2014 (АНФ-37).



Мельниченко Т. В. Структура та властивості конденсованих металевих наноматеріалів, отриманих електронно-променевим випаровуванням у вакуумі. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство».

— Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, 2018. Дата захисту 11.12.2018 р.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі отримання однокомпонентних, композитних, багатошарових фольг та покриттів фізичним осадженням парової фази в вакуумі. Задачу вирішено шляхом встановлення кореляційних залежностей між умовами електронно-променевого осадження парової фази, структурними характеристиками та властивостями наноматеріалів, що дозволило створити наукові засади технології отримання металевих наноматеріалів функціонального призначення електронно-променевим випаровуванням у вакуумі.

Встановлено, що формуванню нанорозмірних структурних складових в конденсованому матеріалі сприяє низька рухливість атомів на поверхні осадження, що забезпечується переохолодженням парової фази, загіненням парового потоку та присутністю на поверхні осадження нерозчинної домішки.

Отримано нанопористі конденсати на основі Ni, Cu, Ti з пористістю відкритого типу до 30 мас. % і питомою поверхнею до 1000 м²/г у вигляді фольги та покриття для використання в якості проміжного прошарку при дифузійному зварюванні тиском матеріалів, покриття медичного стенту та транс-

дермальної форми медичних препаратів. Створена методика отримання інкапсульованих в матрицю галогеніду лужного металу нанопорошків з розміром частинок <10 нм, стійких до агломерації та окислення.

Отримано конденсовані наноматеріали на основі міді з нанодвійниковою субструктурою, які

характеризуються твердістю 2 ГПа, термічною стабільністю структури та фізико-механічними властивостями, що забезпечило їх використання в якості складової демпфіруючого покриття на лопатках ГТД.

Шляхом сумісного осадження парових фаз компонентів, що не змішуються, отримано нанокompозити Cr–Y, Ti–Y, Fe–Cu з високим рівнем мікротвердості та дисипативних властивостей при температурі формування наноструктурованого стану на 200...250 °C вище порівняно з відповідними чистими металами. Показана можливість використання присадного матеріалу у вигляді фольги на основі нанокompозиту Ni–NbC для модифікування структури шва при зварюванні через рідку фазу.

Досліджено закономірності формування методом електронно-променевого осадження структури та властивостей нанощаруватих фольг на основі систем, що складаються з інтерметалідоутворюючих компонентів (Ti–Al, Ni–Al) та систем евтектичного типу (Al–Cu, Al–Si). Нерівноважний стан нанощаруватих фольг, який формується в умовах переохолодження парової фази на поверхні конденсації, сприяє низькотемпературним фазовим і структурним перетворенням в фользі та надпластичній плинності при термомеханічному навантаженні, що забезпечує її використання в якості проміжного прошарку при дифузійному зварюванні тиском матеріалів, що важко деформуються, та різнорідних.

Календарь выставок и конференций в 2019 г.

Дата	Место проведения	Название
05–08.03	Франция, Лион	INDUSTRIE Lyon 2019 (8-я Международная выставка производственных технологий, оборудования, материалов и услуг в производстве)
10–12.03	Гонконг, Гонконг	Asian Ferroalloys Conference 2019 (20-я Азиатская Международная конференция по феросплавам)
10–12.03	Китай, Гуанчжоу	Foundry & Die-casting (FDA) 2019 (Международная выставка литейного и кузнечно-прессового производств, литья под давлением)
16.03	Китай, Шанхай	M+M CHINA 2019 (Международная выставка промышленного оборудования для литейной, металлургической и металлообрабатывающей промышленности)
25–27.03	Китай, Шанхай	CCEC China 2019 — China Int'l Cemented Carbides Exhibition & Conference (12-я Международная выставка и конференция по твердым сплавам)
26–28.03	Польша, Кельце	STOM-BLECH/STOM-TOOL 2019 (12-я выставка металлорежущих и металлообрабатывающих станков и оборудования для листового металла)
26–29.03	Беларусь, Минск	Международная выставка литейного производства и металлургических технологий «Порошковая металлургия»
02–05.04	Украина, Киев	11-я Международная специализированная выставка «Киевская техническая ярмарка-2019»
04–05.04	Чехия, Рожнов-под-Радгоштем	OCELAŘI 2019 (35-я конференция по теории, производству и переработке стали)
09–11.04	Украина, Львов	9-я специализированная выставка «Металл, оборудование, инструмент»
09–12.04	Беларусь, Минск	Международная выставка «Металлообработка-2019»
09–13.04	Италия, Венеция	Aluminium Two Thousand World Congress 2019 (11-й Международный конгресс алюминиевой промышленности)
10–11.04	Германия, Халле	11-й Международный конгресс электронно-лучевых технологий
15–18.04	Болгария, София	MachTech & InnoTech Expo 2019 (Международная выставка металлорежущих и металлообрабатывающих станков, техники для обработки поверхностей и термообработки, лазерных технологий, сварочных аппаратов, промышленной автоматизации и программного обеспечения)
27–30.04	США, Атланта	Metalcasting Congress 2019 (123-й конгресс американского литейного общества)
06–09.05	США, Питтсбург	AISTech 2019 (Конференция и выставка, посвященная технологиям получения железа и стали)
13–15.05	Австрия, Вена	TITANIUM EUROPE 2019 (7-я Международная Европейская конференция и выставка по титану)
15–16.05	Чехия, Брно	Stainless 2019 (10-й Международный конгресс и выставка по нержавеющей стали)
22–24.05	Украина, Запорожье	Выставка «Машиностроение. Металлургия»

Дата	Место проведения	Название
май	Украина, Киев	Сессия научного совета по новым материалам МААН
29–31.05	Китай, Пекин	CIMIE 2019 (13-я Международная металлургическая выставка в Пекине — важнейшая ежегодная выставка в мире!)
04–05.06	Украина, Киев	Международная конференция «Материалы для сварки, наплавки, нанесения покрытий и 3D технологий»
12–13.06	Казахстан, Астана	AMM 2019 — Astana Mining & Metallurgy Congress (10-й Международный горно-металлургический конгресс и выставка)
13–15.06	Китай, Гуанчжоу	GZIMME 2019 — China International Metal & Metallurgy Exhibition 2019 (20-я Международная металлургическая выставка металлов, оборудования, робототехники)
25–29.06	Германия, Дюссельдорф	GIFA + METEC + THERMPROCESS + NEWCAST 2019 (Международные выставки металлургической и металлообрабатывающей промышленности: GIFA 2019 — 14-я Международная выставка литейной промышленности и форум; METEK 2019 + EMC 2019 — 10-я Международная выставка + Европейский металлургический конгресс «Яркий мир металлов»; THERMPROCESS 2019 — 12-я Международная выставка и симпозиум по технологиям и оборудованию для термической обработки; NEWCAST 2019 — 5-я Международная выставка точного литья и оборудования для литья,ковки и отливок)
01–05.09	Швеция, Стокгольм	EUROMAT 2019 (Европейский конгресс и выставка передовых технологий и высококачественных материалов)
02–06.09	Швейцария, Невшатель	METAL 2019 (9-я конференция по металлургии, проводимая ICOM-CC Metals Working Group)
09–13.09	Одесса, Украина	9-я Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»
30.09–02.10	Австрия, Вена	ESSC & DUPLEX 2019 (11-я Европейская конференция по нержавеющей стали «Наука и рынок» и 8-я Европейская конференция и выставка по дуплексной нержавеющей стали)
01–03.10	США, Питтсбург	SMI Metal Engineering Expo 2019 (Выставка технологий металлообработки и прецизионных металлических компонентов)
Октябрь	Словения, Порторож	ICM&T 2019 (27-я Международная конференция по технологиям переработки и материалам: металлам, биоматериалам, композитам, наноматериалам и пр.)
Октябрь	Польша, Катовице	SteelMET 2019 (Международная выставка технологий и готовой продукции в черной и цветной металлургии)
15–17.10	США, Детройт	Heat Treat 2019 (30-я Международная выставка и конференция Общества термической обработки)
19–22.11	Украина, Киев	18-й Международный промышленный форум-2019
04–06.12	Япония, Токио	METAL JAPAN 2019 — Highly-functional metal show (6-я крупнейшая японская выставка высокофункциональных металлов: алюминия, меди, титана, магния, драгоценных металлов, стали, а также технологического оборудования)
30–31.12	Франция, Париж	ICAAM 2019 — International Conference on Aluminium Alloy Metallurgy (21-я Международная конференция по металлургии алюминиевых сплавов)

XI Міжнародна спеціалізована виставка КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК



МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР

Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**2-5 квітня
2019**

Генеральний
інформаційний партнер:

ІНСТРУМЕНТ

Ексклюзивний
медіа партнер:

**ГОЛОВНОГО
ІНЖЕНЕРА**

Технічний
партнер:

RealMedia

ПОДПИСКА на журнал «Современная электрометаллургия» в 2019 г.

Украина: на полугодие (330 грн.), на год (660 грн.). Зарубежные страны: на полугодие (30 \$), на год (60 \$).
Подписку на журнал «Современная электрометаллургия» можно оформить непосредственно через редакцию (в т. ч. на электронную версию) или по каталогам подписных агентств «Преса», «ПресЦентр», «АС-Медіа», «Інформнаука».

Електронна версія журналу на сайті: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/sem

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/sem/rules

Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/sem/license

В 2019 г. в открытом доступе полные архивы статей на журнал за 2008–2017 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Современная электрометаллургия»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77;
205-22-07; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 19.02.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 7,9. Усл. кр.-отг. 8,2. Уч.-изд. л. 9,3
Печать ООО «ДИА», 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.