



ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ВЫПЛАВКА ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ С ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕМ

И. В. Протокивиллов¹, А. Т. Назарчук¹, В. Б. Порохонько¹,
Ю. П. Ивочкин², И. О. Тепляков²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua;

²Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2. E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru

Приведены результаты экспериментов по электрошлаковой выплавке титановых слитков с импульсным питанием процесса электрической энергией. Для проведения опытных плавки модернизировали силовой трансформатор ТШП-10-1, что позволило осуществлять электрошлаковый процесс в импульсном режиме, регулировать частотные и амплитудные характеристики импульсов рабочего напряжения в процессе плавки. Экспериментальные исследования проводили при выплавке слитков титана марки Grade 4 диаметром 84 мм. По результатам экспериментов оценивали стабильность электрошлакового процесса, его электрические режимы, формирование поверхности слитков, их макроструктуру и распределение твердости в продольном сечении. Изучены две схемы импульсного питания электрошлакового процесса с различной продолжительностью импульсов и пауз электропитания и уровнем напряжения на ванне во время паузы. В ходе проведенных экспериментов показана возможность электрошлаковой выплавки титановых слитков в импульсном режиме при сохранении стабильности электрошлакового процесса и с хорошим формированием боковой поверхности слитка, плотной макроструктурой без металлургических дефектов. Установлена возможность управления кристаллизацией титановых слитков и измельчения их литой структуры путем импульсного электропитания и соответствующего порционного тепловложения. Библиогр. 9, табл. 1, ил. 5.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; импульсное электропитание; титан; слиток; макроструктура; порционное тепловложение

Перспективным направлением повышения эффективности процесса электрошлакового переплава (ЭШП) является разработка различных способов воздействия на тепломассоперенос и кристаллизацию металла, позволяющих еще на стадии выплавки слитка управлять свойствами выплавляемых сплавов. Одним из таких способов является импульсное питание электрошлакового процесса электрической энергией. Эффективность его использования для управления процессом ЭШП описана в работах [1, 2]. Поскольку шлаковая и металлическая ванны характеризуются большим уровнем тепловой инерционности, можно в широких пределах изменять режимы импульсного питания электрошлакового процесса, воздействуя тем самым на тепломассоперенос и кристаллизацию металла, при сохранении хорошего качества формирования слитка. Однако сложность импульсного управления высокими токами (десятки килоампер) и дороговизна соответствующей аппаратуры существенно ограничивали возможности использования данного способа воздействия на ЭШП.

С появлением современной элементной базы, прежде всего мощных силовых тиристорных с рабо-

чими токами до 6 кА и выше [3, 4], возможности использования импульсного ввода мощности для управления процессом ЭШП существенно расширились. Кроме снижения удельного расхода электроэнергии, импульсное питание позволяет воздействовать на образование и отрыв капель электродного металла, тепловые и гидродинамические процессы в шлаковой и металлической ваннах, а также управлять кристаллизацией металла слитка [1, 2, 5, 6].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании технологических и металлургических особенностей процесса ЭШП титана в условиях импульсного питания электрической энергией. Требовалось разработать оборудование для импульсного питания электрошлакового процесса, изучить закономерности формирования слитка и его кристаллизационной структуры.

В работах [7, 8] показана эффективность использования внешних электромагнитных воздействий для управления структурообразованием титановых слитков при ЭШП. Установлено, что импульсное воздействие продольным магнитным полем достаточной индукции приводит к самопроиз-



вольному периодическому изменению тока плавки, что вызвано, вероятно, деформацией поверхности шлаковой ванны и увеличением электросопротивления участка цепи расходуемый электрод–металлическая ванна. Во время импульса магнитного поля ток плавки снижается примерно на 30...70 %, а во время паузы восстанавливается до исходного значения, т. е. происходит импульсное (дискретно-порционное) тепловыделение в шлаковой ванне.

При выплавке слитков диаметром 80...100 мм и индукции внешнего магнитного поля 0,16...0,24 Тл лучшие результаты по измельчению структуры металла и формированию поверхности слитка получены при продолжительностях импульса и паузы электромагнитного воздействия соответственно 1...2 и 6...15 с. Такое воздействие вызывало снижение тока плавки во время импульса магнитного поля до 70 % [7].

Таким образом, представляет интерес проведение экспериментов с использованием импульсного электропитания, воспроизводящих аналогичный характер изменения тока плавки, но в результате изменения напряжения источника питания. Также для достижения резонансных колебаний осуществляли эксперименты с применением более высокой частоты модуляции тока, приближающейся к частоте собственных колебаний металлической ванны [1].

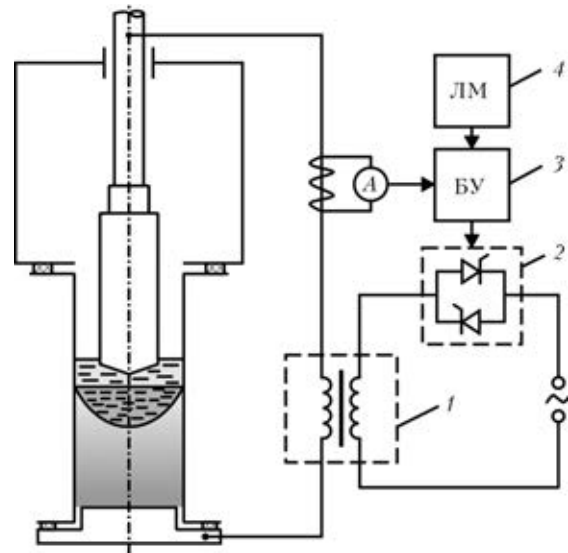


Рис. 1. Схема электрошлаковой выплавки титановых слитков с импульсным электропитанием: 1 – силовой трансформатор ТШП-10-1; 2 – блок тиристор; 3 – блок управления тиристорами; 4 – программируемый логический модуль

Эксперименты по выплавке слитков титана марки Grade 4 диаметром 84 мм выполняли в электрошлаковой печи камерного типа (рис. 1). Для питания установки использовали модернизированный силовой трансформатор ТШП-10-1, оснащенный блоком управляющих тиристор, включенных

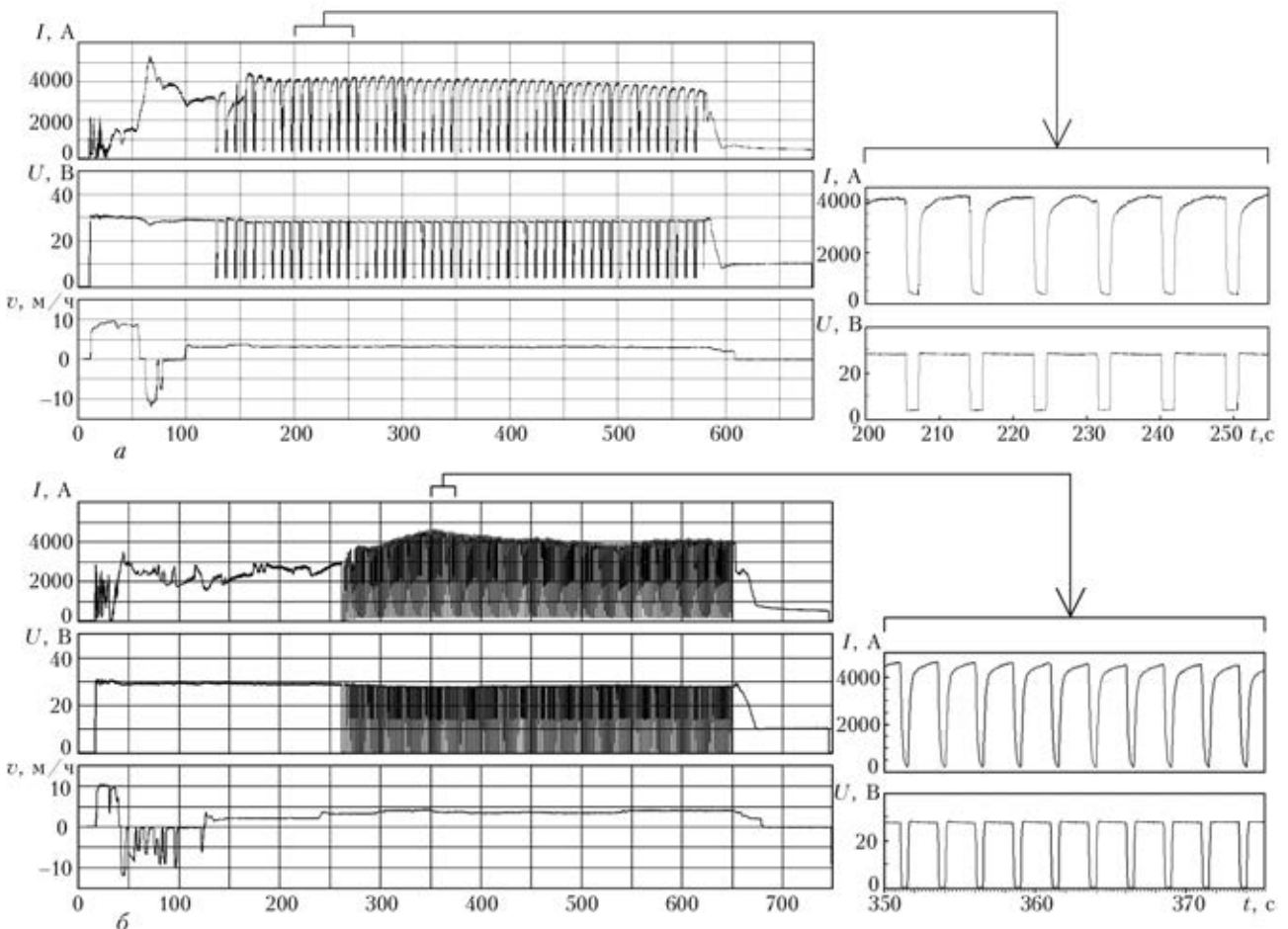


Рис. 2. Регистрограммы процессов плавки с импульсным электропитанием, с: а – $t_{имп} = 7$, $t_{пауз} = 1,4$ (плавка № 825); б – $t_{имп} = 2$, $t_{пауз} = 0,5$ (плавка № 826)



Режимы экспериментальных плавков с импульсным электропитанием

№ плавки	$v_{эл}$, м/ч	d , мм		t , с		U , В		I , А	
		электрода	слитка	импульса	паузы	импульса	паузы	импульса	паузы
825	3,0...3,5	48	84	7	1,4	28	4	3900...4100	400
826	3,0...3,7	48	84	2	0,5	28	0	4000...4150	0

Примечание. Использован флюс марки АН-Т4: глубина шлаковой ванны составляет 40 мм.

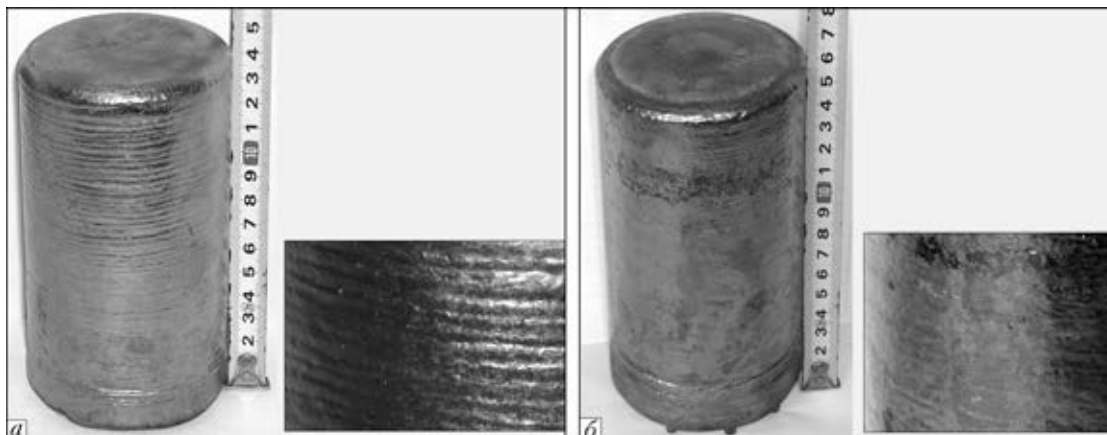


Рис. 3. Внешний вид и боковая поверхность слитков титана, выплавленных с импульсным электропитанием: а — плавка № 825; б — плавка № 826

встречно-параллельно в цепь первичной обмотки. Схема управления тиристорами позволяет плавно регулировать напряжение в процессе плавки в диапазоне 0...72 В при токе до 10 кА и предусматривает быстроедействие защиты от перегрузок. Для реализации импульсного режима работы трансформатора в цепь управления тиристорами включен программируемый логический модуль SR2 В1218D, позволяющий с дискретностью 0,1 с в широких пределах (0,1...999 с) регулировать продолжительность импульсов и пауз напряжения во вторичной цепи силового трансформатора, реализуя различные схемы импульсного питания процесса ЭШП

(импульс–пауза, группа импульсов–пауз с различной глубиной модуляции и т. д.)

Режимы экспериментальных плавков приведены в таблице и на рис. 2. По результатам экспериментов оценивали стабильность электрошлакового процесса, его электрические параметры, формирование поверхности слитков, их макроструктуру и распределение твердости в продольном сечении.

Исследовано две схемы импульсного питания электрошлакового процесса. В первой (плавка № 825) питание осуществляли импульсами переменного напряжения продолжительностью 7 с при паузе 1,4 с, во время которой напряжение снижали до 4 В (рис. 2, а). Во второй (плавка № 826) продолжительность импульсов напряжения на ванне составляла 2 с при паузе 0,5 с, во время которой полностью отключали напряжение (рис. 2, б).

В исследуемом диапазоне режимов импульсного воздействия электрошлаковый процесс протекал устойчиво, без нарушения стабильности. В соответствии с варьированием электрического напряжения на ванне циклически изменялся ток плавки (рис. 2). Фронт нарастания тока имел более полугую форму, нежели фронт нарастания напряжения, что, очевидно, связано с охлаждением шлаковой ванны во время паузы питания и нелинейностью электросопротивления шлака.

Снижение вводимой мощности при плавках в импульсном режиме вызвало незначительное (на 3...5 %) уменьшение скорости плавления электрода и соответствующее увеличение продолжительности процесса. Однако в целом удельный расход электроэнергии, по сравнению с плавкой в стационар-

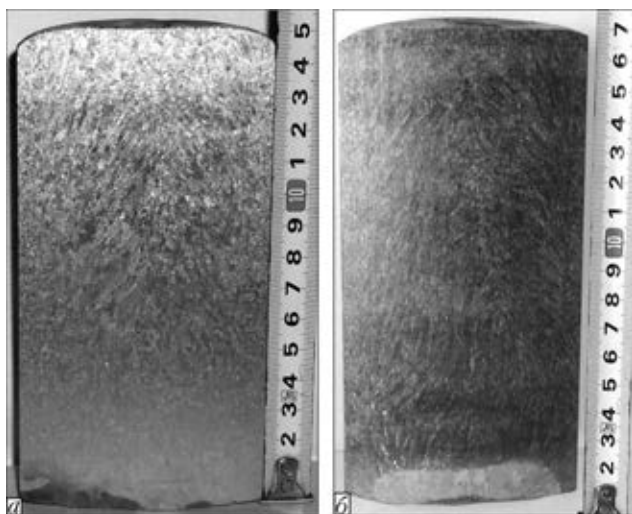


Рис. 4. Макроструктура титановых слитков, выплавленных с импульсным электропитанием: а — плавка № 825; б — плавка № 826

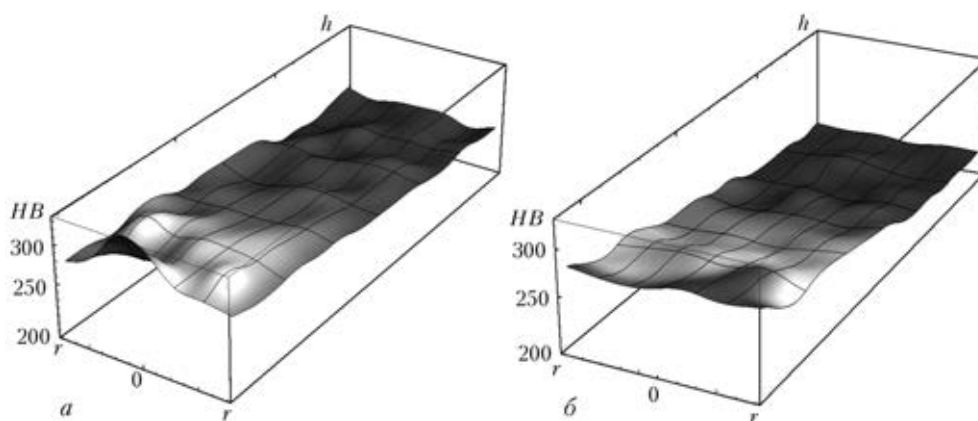


Рис. 5. Распределение твердости HV по продольному сечению слитков: a — плавка № 825; b — плавка № 826; h, r — соответственно высота и радиус слитка

ном режиме (с непрерывным электропитанием), снизился на 7...10 %. Вероятно, это связано с интенсификацией каплеобразования и тепломасообменных процессов на торце расходующего электрода за счет вибраций, вызванных электродинамическими силами, что в итоге способствует повышению теплового КПД плавки [6, 9].

Внешний вид выплавленных слитков приведен на рис. 3. В обоих случаях слитки имеют хорошо сформированную боковую поверхность. На поверхности слитка № 825 отмечены незначительные гофры, вызванные импульсным тепловложением (рис. 3, a). Механизм образования гофр связан с увеличением скорости охлаждения металла во время паузы электропитания и соответствующим циклическим изменением толщины шлакового гарнисажа на поверхности слитка. Глубина гофр составляла в среднем 0,1...0,15 мм, что не ухудшило существенно качество поверхности слитка. При продолжительности паузы 0,5 с гофр на поверхности слитка практически не обнаружено (рис. 3, b).

Макроструктуры продольного сечения выплавленных слитков представлены на рис. 4. В обоих случаях металл характеризуется плотной структурой, отсутствием шлаковых включений, несплавлений, усадочной пористости и других металлургических дефектов.

Периферийные участки слитков (возле боковой поверхности) имеют мелкозернистую глобулярную структуру, средний характерный размер которых составлял 0,5...1,5 мм. Ширина данной зоны у слитка № 825 достигала 13 мм, что несколько больше, чем у слитка № 826 (11 мм).

В центральной части слитков зафиксированы как глобулярные, так и вытянутые в направлении теплоотода столбчатые зерна со средним размером 1,87×8,50 мм (слиток № 825) и 1,95×10,15 мм (слиток № 826). Выраженной зоны «слабины» по оси слитков не выявлено.

В целом анализ макрошлифов полученных слитков свидетельствует о измельчении и гомогенизации их макроструктуры, по сравнению с металлом титановых слитков, выплавленных при стационарных режимах, для которых характерна ярко выражен-

ная «елочная» структура металла с размерами дендритов, соизмеримыми с радиусом слитка.

Вероятно, отмеченный эффект обусловлен рядом факторов, прежде всего изменением температурного градиента на фронте кристаллизации за счет пауз электропитания и гидродинамическими «ударами» на растущие в двухфазной зоне кристаллиты при включении и выключении электрического напряжения. Импульсное электропитание также вызывает механические колебания расплава металлической ванны, способствующие ломке дендритов.

Распределение твердости HV в продольном сечении слитков (рис. 5) свидетельствует о довольно высокой степени гомогенности литого металла. Повышение твердости металла корневой части слитка является типичным для большинства металлургических процессов и связано с повышенным содержанием примесей в данной зоне.

Проведенные эксперименты показали возможность управления кристаллизацией титановых слитков при ЭШП путем импульсного питания электрической энергией. Дальнейшие исследования целесообразно направить на установление взаимосвязи между параметрами структуры литого металла и такими режимами воздействия, как частота импульсов, их скважность и уровень модуляции напряжения для разных типоразмеров выплавливаемых слитков.

Выводы

1. Модернизирован силовой трансформатор ТШП-10-1 для целей импульсного питания электрошлакового процесса с возможностью регулирования частотных и амплитудных характеристик импульсов рабочего напряжения в процессе плавки.
2. Показана возможность электрошлаковой выплавки титановых слитков с импульсным питанием электрической энергией при сохранении стабильности электрошлакового процесса и хорошим формированием боковой поверхности слитка с плотной макроструктурой, без металлургических дефектов.
3. Использование импульсного питания позволило снизить удельный расход электроэнергии



на 7...10 %, по сравнению с плавкой в стационарном режиме.

4. Получены новые экспериментальные данные об особенностях формирования макроструктуры титановых слитков в условиях импульсного электропитания. Выявлен факт измельчения структуры этого металла, по сравнению с металлом слитков традиционного ЭШП.

Работы выполнены при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект № Ф53.7/027) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект Укр_ф_а № 13-08-90444).

1. Управление процессами кристаллизации слитка ЭШП // Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, Б. И. Медовар и др. // Проблемы стального слитка: Тр. V конф. по слитку (Киев, сент. 1974). — М.: Металлургия, 1974. — С. 707–714.
2. Электрошлаковые печи / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.

3. ООО «Элемент-Преобразователь»: Тиристоры низкочастотные таблеточной конструкции. — <http://www.element.zp.ua/products/list.php?category=29>
4. Railton electronics: thyristor disc. — <http://www.railtonelectronics.com/powerelectronics.html>
5. Новая технология электрошлаковой выплавки инструментальных заготовок / А. В. Абрамов, В. И. Лоскутов, В. Г. Ковалев // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 4. — С. 10–12.
6. Пат. 2337979 РФ, МПК С 22 В 9/18; Н 05 В 7/148. Способ управления режимом работы установки электрошлакового переплава и устройство для его осуществления / А. В. Абрамов, А. Н. Ильгачев, Д. Г. Михадаров. — Оpubл. 10.11.2008; Бюл. № 31.
7. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокивилов И. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
8. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки / А. Т. Назарчук, И. В. Протокивилов, Ю. П. Ивочкин и др. // Там же. — 2013. — № 4. — С. 21–26.
9. Иваненко О. Г., Роцин В. Е., Пovaloцкий Д. Я. Гидродинамика формирования капли при оплавлении заготовки в шлаке // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1984. — № 4. — С. 15–18.

Presented are the results of experiments on electroslag melting of titanium ingots at pulsed supply of process with electric power. To carry out the experimental melting, the power transformer TShP-10-1 was subjected to modification, that allowed realizing the electroslag process at a pulsed mode, adjusting the frequency and amplitude characteristics of pulses of operating voltage during melting. Experimental investigations were carried out in melting of 84 mm diameter ingots of titanium of Grade 4. From the experimental results the stability of electroslag process, its electrical conditions, formation of surface of ingots, their macrostructure and distribution of hardness in longitudinal section were evaluated. Two schemes were studied for pulsed supply of electroslag process at different duration of pulses and pauses of electric supply and voltage level at the pool during the pause. During experiments the feasibility of electroslag melting of titanium ingots at pulsed mode, keeping the stability of electroslag process and good formation of lateral surface of ingot, dense macrostructure without metallurgical defects was shown. Possibility of control of solidification of titanium ingots and refining of their cast structure by pulsed electric supply and appropriate portion heat input was established. Ref. 9, Table 1, Figures 5.

Key words: electroslag remelting; pulsed electric supply; ingot; macrostructure; portion heat input

Поступила 29.01.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com



МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. — Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с.

Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением металлургии дуговой сварки, разработкой сварочных материалов и технологий их производства.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала