

# ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАКАЛОЧНОГО ДИСКА В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРАКЦИИ ИЗ РАСПЛАВА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКЕ В СЕКЦИОННОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Д. А. Калашник<sup>1</sup>, В. А. Шаповалов<sup>1</sup>, В. Г. Кожемякин<sup>1</sup>,  
А. В. Веретильник<sup>1</sup>, П. Б. Калюжный<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

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

<sup>2</sup>Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Укрини.

03142, г. Киев, бульв. Академика Вернадского, 34/1. E-mail: metal@ptima.kiev.ua

Рассмотрено тепловое состояние закалочного диска. Непосредственному исследованию подвергали такие параметры, как скорость вращения, геометрические размеры диска, площадь контакта расплавленного металла с диском. Применена математическая модель дифференциального уравнения теплового состояния для твердого тела. При расчетах применили метод конечных элементов с использованием программного продукта Comsol Multiphysics. Получены нелинейные зависимости между геометрическими размерами и температурой нагрева закалочного диска. Проведено исследование и определено влияние технологических параметров на нагрев диска. Предложен технологический режим, в результате которого наблюдается значительное уменьшение средней температуры закалочного диска. Библиогр. 6, ил. 6.

**Ключевые слова:** тепловое состояние; закалочный диск; диспергирование; чешуйки; индукционная плавка; секционный кристаллизатор; быстрозакаленные сплавы

В настоящее время быстрозакаленные сплавы по сравнению с кристаллическими являются более перспективными для применения во многих сферах производства, благодаря уникальным физическим свойствам [1–3]. Несмотря на то, что для получения быстрозакаленных материалов существует множество технологий, распространение получил метод экстракции (диспергирования) из расплава. Этот метод отличается высокой скоростью закалки за счет контакта расплава с твердым телом с высокой теплопроводностью. В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины создано экспериментальное оборудование для экстракции расплава из секционного кристаллизатора и сделаны первые шаги в разработке технологии диспергирования (рис. 1) [4]. В процессе плавки переплавляемая заготовка подвергается действию электромагнитного поля. После наведения жидкой ванны металла медный диск опускается и благодаря высокой скорости вращения (1000...5000 тыс. об/мин) осуществляется процесс диспергирования. Данная технология диспергирования отличается способом переплава исходной заготовки. Именно индукционная плавка в секционном кристаллизаторе обеспечивает отжиг расплавленного металла от стенок тигля и тем самым

дает возможность получать материалы повышенной чистоты без примесей от футеровки тигля.

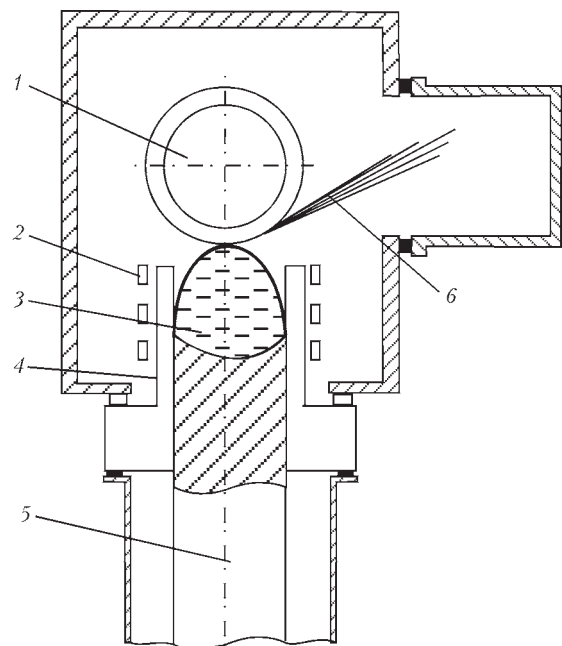


Рис. 1. Схема установки диспергирования из расплава: 1 — закалочный диск; 2 — индуктор; 3 — расплавленная ванна металла; 4 — секционный кристаллизатор; 5 — переплавляемая заготовка; 6 — быстрозакаленные чешуйки

Одним из вопросов, который так и не был рассмотрен в предыдущих исследованиях — это тепловое состояние закалочного диска. Несмотря на то, что диск играет непосредственную роль в отводе тепла от расплава, должного внимания данному элементу оборудования не уделялось как в отечественной науке, так и зарубежной [5]. Очевидно, что форма и геометрические размеры закалочного диска существенно влияют на скорость закалки, однако ввиду скоротечности процесса диспергирования проведение экспериментов в вакуумной камере и непосредственно на диске — затруднительная задача. Для решения данной задачи в рамках представленного исследования использовали методы математического моделирования тепловых процессов.

В данной статье рассмотрено влияние скорости вращения диска, его размеры и площадь контакта с расплавленным металлом на тепловое состояние закалочного диска.

Цель работы — моделирование теплового состояния закалочного диска в процессе охлаждения расплава в виде чешуек и изучение влияния технологических параметров на скорость закалки.

**Методика исследований.** При сверхбыстрой закалке металлических чешуек основное охлаждение расплава осуществляется в результате контактного теплообмена с закалочным диском. Дифференциальное уравнение теплопроводности для твердого тела в декартовых координатах определяется уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{cp} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right).$$

Так как дифференциальное уравнение теплопроводности описано в общем виде, то для получения полного математического описания использовали следующие граничные и начальные условия:

радиус диска, м ..... 0,09; 0,18; 0,045  
коэффициент теплоотдачи между расплавленным

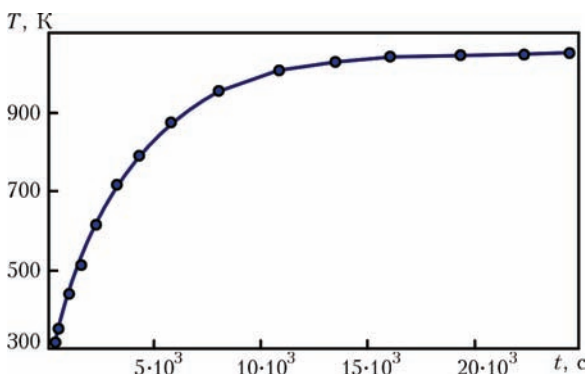


Рис. 2. Среднее распределение температуры в диске при частоте вращения от 1 до 80 с<sup>-1</sup>

металлом и диском, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) .....	800
коэффициент теплоотдачи между диском и окружающей средой, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) .....	20
частота вращения закалочного диска, с <sup>-1</sup> .....	1...80
отношение площади контакта расплава с диском к площади контакта диска с окружающей средой .....	5/360; 10/360; 15/360
начальная температура диска, К .....	293,15
температура окружающей среды, К .....	320
температура расплавленного металла, К .....	1700

Материал, из которого выполнен закалочный диск — медь. Для расчета использовали следующие параметры:

коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град) .....	401
плотность, кг/м <sup>3</sup> .....	8933
удельная теплоемкость, Дж/(кг·град) .....	385

Расчет теплового состояния закалочного диска проводили на базе расчетного модуля Comsol Multiphysics.

**Результаты и обсуждение.** В результате моделирования показано распределение температуры в закалочном диске в зависимости от радиуса диска, площади контакта расплава с диском, частоты вращения. Одним из существенно важных технологических параметров при получении быстрозакаленных чешуек является скорость вращения закалочного диска. Скорость вращения влияет как на скорость закалки, так и на геометрические размеры получаемых образцов. Под геометрическими размерами получаемых чешуек в первую очередь подразумевается толщина. В случае получения чешуек методом экстракции из расплава объем затвердевшего металла определяется исключительно скоростью вращения диска [6]. Результаты расчетов показали, что среднее распределение температуры в диске не зависит от скорости вращения, зависимость температуры от скорости остается без изменений в диапазоне исследуемых частот от 1 до 80 с<sup>-1</sup> (рис. 2). Это можно объяснить высоким коэффициентом теплопроводности у материала диска (медь). При частоте вращения диска  $t = 1$  с<sup>-1</sup> наблюдается скачкообразный нагрев поверхности рабочей дорожки, а при более высоких частотах максимальная температура диска описывается кривой квадратичного корня (рис. 3). Однако разница локального нагрева порядка 5-ти градусов существенно не влияет на технологию получения быстрозакаленных материалов. Графики зависимости между средней и минимальной температурой существенным образом не зависят от частоты вращения диска.

Выбор радиуса закалочного диска является важной задачей с точки зрения оптимизации оборудования. Сравнительно малые размеры диска могут

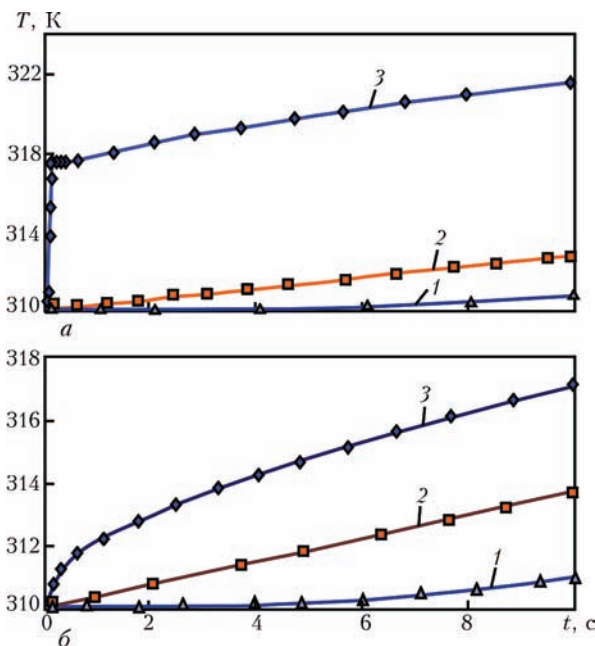


Рис. 3. Распределение температуры в зависимости от частоты вращения диска: *a* — 80 с<sup>-1</sup>; *b* — 1 с<sup>-1</sup>; 1 — минимальная; 2 — средняя; 3 — максимальная температуры

привести к уменьшению скорости закалки образцов, а большие размеры значительным образом влияют на стоимость изготовления оборудования.

Результаты моделирования средней температуры закалочного диска при различных радиусах представлены на рис. 4, из которых видно, что в условиях установившегося режима радиус диска не влияет на его температуру.

В ходе анализа полученных данных установлено, что график изменения средней температуры диска с радиусом 180 мм описывается уравнением

$$y(x) = \frac{a}{1 + e^{-k(x-x_c)}}$$

где  $a = 1043,3$ ;  $k = 3,5$  и  $x_c = 1265,9$ ,

а для диска с радиусом 90 и 45 мм уравнением

$$y(x) = ae^{-k(x-x_c)}$$

где коэффициенты уравнения для диска с радиусом 90 мм равны:  $a = 1037,5$ ;  $k = 7,1 \cdot 10^{-4}$ ;  $x_c = 525,6$ , а для диска с радиусом 45 мм:  $a = 1034,9$ ;  $k = 1,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $x_c = 1103,5$ .

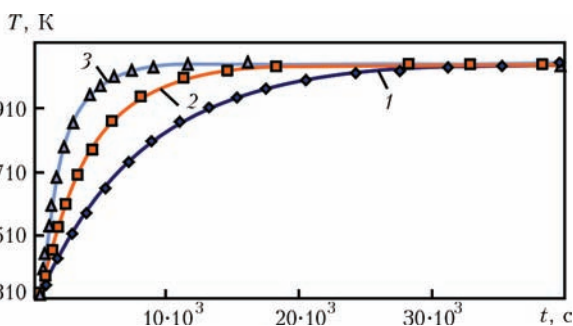


Рис. 4. Средняя температура диска в зависимости от его радиуса, мм: 1 — 180; 2 — 90; 3 — 45

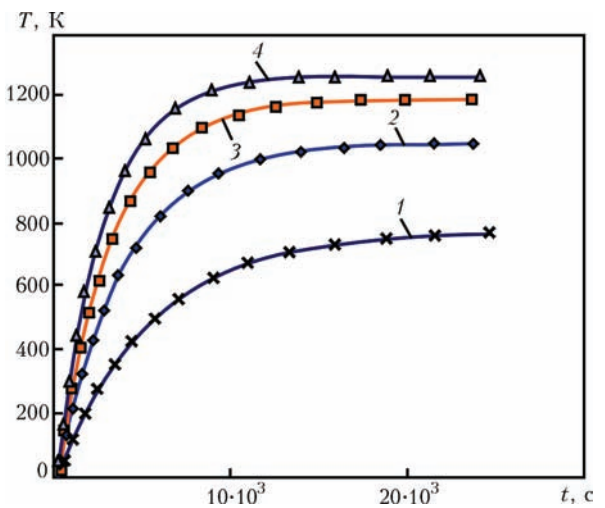


Рис. 5. Зависимость между средней температурой закалочного диска и длиной окружности, которая контактирует с расплавом, мм: 1 — 8,1; 2 — 16,2; 3 — 24,3; 4 — 32,4

Анализируя полученные зависимости, определили максимальную кривизну графиков изменения температур в диске с варьируемым радиусом. Для дисков с радиусами 45, 90, 180 мм максимальная кривизна поверхности составляет  $5,031 \cdot 10^{-6}$ ;  $8,1088 \cdot 10^{-6}$ ;  $1,042 \cdot 10^{-5}$  соответственно.

Важным параметром, который в значительной мере определяет тепловое состояние закалочного диска, является площадь контакта закалочного диска с расплавленным металлом. На рис. 5 представлена зависимость средней температуры закалочного диска от площади контакта. Однако в виду того, что в данной работе рассмотрена упрощенная модель закалочного диска, представленная в виде окружности, параметр, который подвергали непосредственному изучению — это длина сегмента окружности.

Можно заметить, что между температурой в установившемся режиме и длиной сегмента, контактирующей с расплавленным металлом, наблюдается прямая зависимость. Однако вместе с тем, данная зависимость не является линейной. Отношение между максимальными температурами сокращается с увеличением площади контакта.

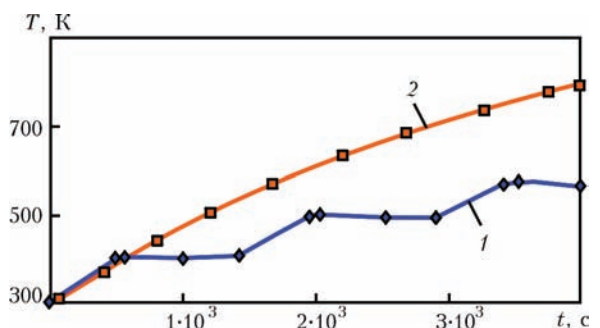


Рис. 6. Зависимость средней температуры закалочного диска при разных технологических режимах: 1 — с циклическими остановками; 2 — непрерывный

Одним из возможных предположений по уменьшению температуры закалочного диска может быть использование технологического режима с циклическими остановками. На практике такое решение может реализовано за счет поднятия закалочного диска на определенную высоту, при которой не происходит контакта расплавленного металла с рабочей поверхностью диска. Зависимость между средней температурой диска и временем, в течение которого использовали технологический режим с циклическим темпом, представлена на рис. 6. Как видно из рисунка, режим с технологическими остановками существенным образом понижает температуру закалочного диска. На момент времени равный 4000 секунд разница температур между технологическими режимами составляет 228 К. Аппроксимируя полученные результаты, показано, что в установившемся режиме разница составит порядка 400 К.

Однако, несмотря на понижение средней температуры диска, наблюдается значительное уменьшение производительности. За расчетное время 4000 секунд разница по массе составляет 20 кг.

#### Выводы

В ходе данной работы на основании математического моделирования рассчитано тепловое состояние закалочного диска в процессе диспергирования из расплавленного металла при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе. Среди геометрических размеров закалочного диска и технологических параметров существенное значение на нагрев диска оказывает площадь контакта расплавленного металла с диском. Установлено, что разница между средними значениями температур подчиняется логарифмической зависимости, то есть с увеличением площади контакта в два раза разница температур в установившемся режиме не пропорциональна двукратному увеличению. С точки зрения уменьшения температуры закалочного диска рекомендуется сократить площадь контакта до минимального значения.

В работе предложен режим технологического процесса, который также позволяет уменьшить величину нагрева закалочного диска. Однако данный способ имеет свои недостатки, а именно, уменьшение производительности.

#### Список литературы

1. Zhang H. (2017) Magnetocaloric effect of Ni–Fe–Mn–Sn microwires by melt extraction technique. *Material and Design*, **114**, 1–9.
2. Qian M. F. (2016) Microstructural evolution of Ni–Mn–Ga microwires during the melt-extraction process. *J. of Alloys and Compounds*, **660**, 244–251.
3. Li D. (2016) Superelasticity of Cu–Ni–Al shape-memory fibers prepared by melt extraction technique. *Intern. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, **23**, 928–933.
4. Калашник Д. А., Шаповалов В. А., Шейко И. В. и др. (2015) Анализ технологических особенностей получения быстрозакаленных сплавов (Обзор). *Современная электротехнология*, **3**, 27–34.
5. Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А., Мельник А. С. (2008) Тепловое состояние барабана-холодильника плазменно-дуговой установки в процессе сверхбыстрой закалки расплава. *Там же*, **3**, 42–46.
6. Калашник Д. А., Никитенко Ю. А., Шаповалов В. А. и др. (2016) Форма и геометрические размеры быстрозакаленных материалов, полученных диспергированием из расплава при ИПСК. *Там же*, **3**, 31–34.

#### References

1. Zhang, H. (2017) Magnetocaloric effect of Ni–Fe–Mn–Sn microwires by melt extraction technique. *Material and Design*, **114**, 1–9.
2. Qian, M.F. (2016) Microstructural evolution of Ni–Mn–Ga microwires during the melt-extraction process. *J. of Alloys and Compounds*, **660**, 244–251.
3. Li, D. (2016) Superelasticity of Cu–Ni–Al shape-memory fibers prepared by melt extraction technique. *Intern. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, **23**, 928–933.
4. Kalashnik, D.A., Shapovalov, V.A., Sheiko, I.V. et al. (2015) Analysis of technological peculiarities of producing rapid-hardening alloys (Review). *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 27–34 [in Russian].
5. Shapovalov, V.A., Nikitenko, Yu.A. and Melnik, A.S. (2008) Thermal state of drum-cooler of plasma-arc installation in process of superfast melt hardening. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 40–43.
6. Kalashnik, D.A., Nikitenko, Yu.A., Shapovalov, V.A. et al. (2016) Shape and geometric sizes of rapid-hardening materials produced by dispersion from melt in IMSM. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 31–34 [in Russian].

#### ТЕПЛОВИЙ СТАН ДИСКУ-ОХОЛОДЖУВАЧА В ПРОЦЕСІ ЕКСТРАКЦІЇ З РОЗПЛАВУ ПРИ ІНДУКЦІЙНІЙ ПЛАВЦІ В СЕКЦІЙНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Д. О. Калашник<sup>1</sup>, В. О. Шаповалов<sup>1</sup>, В. Г. Кожемякін<sup>1</sup>, О. В. Веретільник<sup>1</sup>, П. Б. Калюжний<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

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

<sup>2</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України.

03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1. E-mail: metal@ptima.kiev.ua

Розглянуто тепловий стан диска-охолоджувача. Безпосередньому дослідженню піддавали такі параметри, як швидкість обертання, геометричні розміри диска, площу контакту розплавленого металу з диском. Застосовано математичну модель диференціального рівняння теплового стану для твердого тіла. Для розрахунків застосува-



ли метод кінцевих елементів з використанням програмного продукту Comsol Multiphysics. Отримано нелінійні залежності між геометричними розмірами і температурою нагріву диска-охладжувача. Проведено дослідження та визначено вплив технологічних параметрів на нагрів диска. Запропоновано технологічний режим, в результаті якого спостерігається значне зменшення середньої температури диска-охладжувача. Бібліогр. 6, іл. 6.

**Ключові слова:** тепловий стан; диск охолоджувач; диспергування; луска; індукційна плавка; секційний кристалізатор; швидкозагартвані сплави

**THERMAL STATE OF HARDENING DISC DURING EXTRACTION FROM MELT IN INDUCTION MELTING IN SECTIONAL CRYSTALLIZER**  
**D.A. Kalashnik<sup>1</sup>, V.A. Shapovalov<sup>1</sup>, V. G. Kozhemyakin<sup>1</sup>, A.V. Veretilnik<sup>1</sup>, P. B. Kalyuzhnyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

<sup>2</sup>Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine.

34/1 Academician Vernadsky Blvd., 03142, Kyiv, E-mail: metal@ptima.kiev.ua

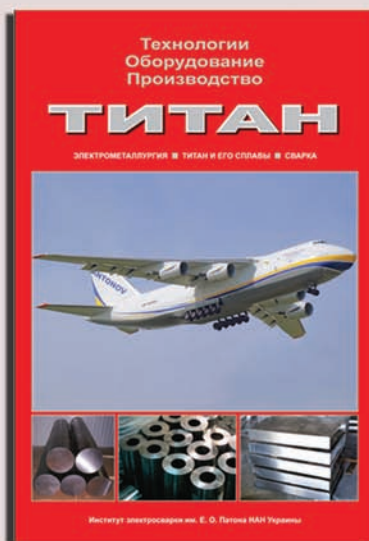
The thermal state of a hardening disc is considered. Such parameters were subjected to investigation as rotation speed, geometric dimensions of the disc, area of molten metal contact with the disc. A mathematical model of the differential equation of the thermal state for a solid body was applied. In calculations, the finite element method was used using the Comsol Multiphysics software product. Nonlinear relationships between the geometric dimensions and the temperature of the hardening disc heating were obtained. A study was made and the influence of technological parameters on the disc heating was determined. A technological mode was suggested, as a result of which a significant decrease in the mean temperature of the hardening disc is observed. Ref. 6, Fig. 6.

**Key words:** thermal state; hardening disc; dispersion; flakes; induction melting; sectional crystallizer; rapidly quenched alloys

Поступила 21.11.2017

**ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»**

<http://www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations>.



«Титан. Технологии. Оборудование. Производство». — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. — 254 с. Выпуск четвертый.

Сборник включает более сорока статей, опубликованных в основном в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2014–2016 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов, оборудования и материалов при производстве и сварке титана и его сплавов.

Представлены обзоры по аддитивному производству и сварке трением металлических материалов. Приведены направления деятельности НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по промышленному производству слитков титановых сплавов и созданию новых сплавов на основе титана.

Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана. Полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

Предыдущие три выпуска сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство», включающие статьи из журналов «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за периоды 2001–2004, 2005–2010, 2011–2013 гг. находятся в открытом доступе на сайте Издательского Дома «Патон».

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала