

## 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; быстрозакаленные 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 ЭСП;

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)

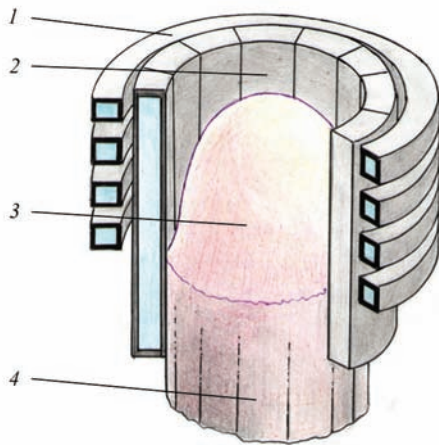


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ИПСК: 1 — индуктор; 2 — секционный кристаллизатор; 3 — металлическая ванна; 4 — слиток

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-

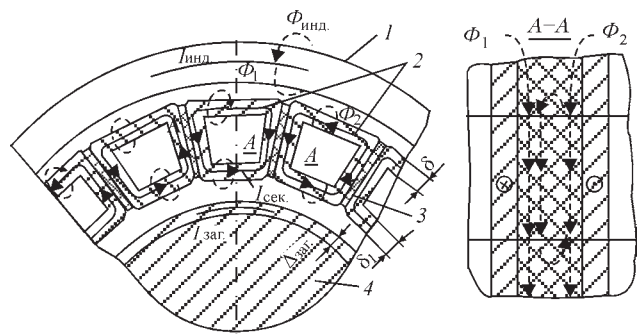


Рис. 2. Схема протекания токов в элементах системы индуктор–кристаллизатор–ванна жидкого металла ( $I_{инд}$ ,  $I_{сек}$  и  $I_{заг}$ ) и вероятная картина магнитных полей в этой системе: 1 — индуктор; 2 — секции кристаллизатора; 3 — диэлектрическая прокладка; 4 — ванна жидкого металла

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, глухонный 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 глухонном 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, м <sup>3</sup> /ч	8...12	8...10	12...16	10...12	до 50
Производительность, кг/ч, т/год	до 80	до 50	—	—	—
Габаритные размеры, мм			50	40	500
длина	6580	—	1940	3330	8300
ширина	5180	—	1650	2320	6000
высота	4675	—	3560	3945	9700

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

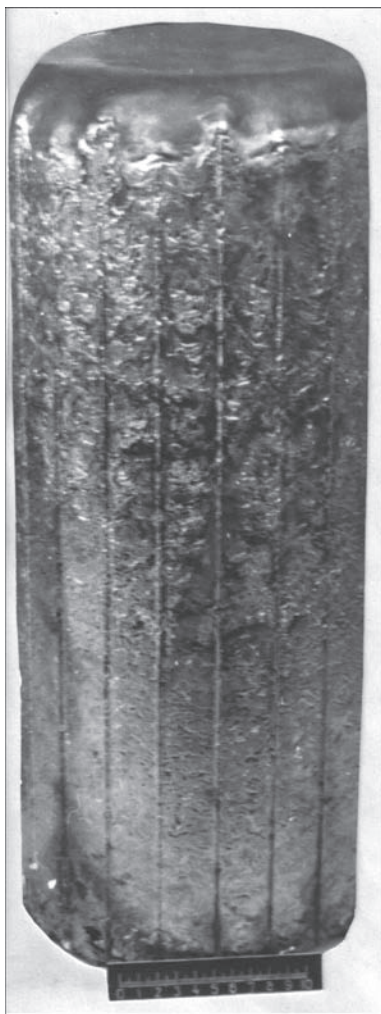


Рис. 3. Внешний вид слитка ИПСК из титанового сплава ОТ4-2 диаметром 225 мм

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).

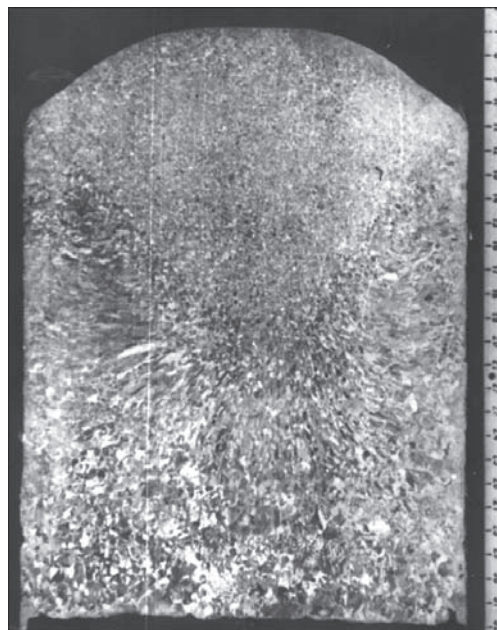


Рис. 4. Макроструктура слитка ИПСК из титанового сплава

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

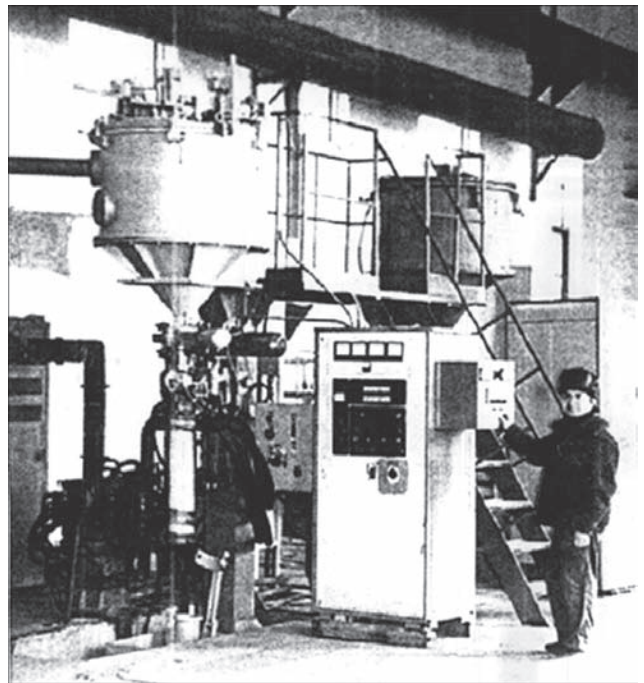


Рис. 5. Опытно-промышленная установка ОП-151

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-

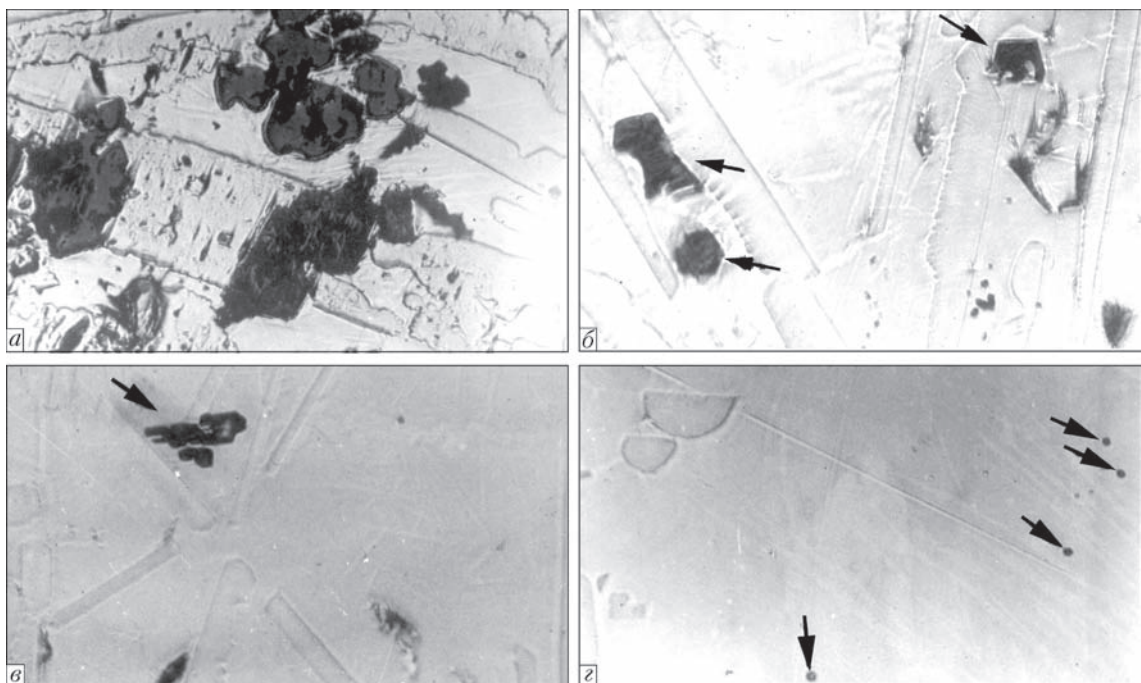


Рис. 6. Неметаллические включения в слитках лигатуры АВТУ: *а* — некондиционный металл; *б* — кондиционный металл и выплавленный по технологии ИПСК из отходов лигатуры; *в* — в проточной атмосфере аргона; *г* — в аргоне с флюсом  $\text{CaF}_2$  ( $\times 600$ )

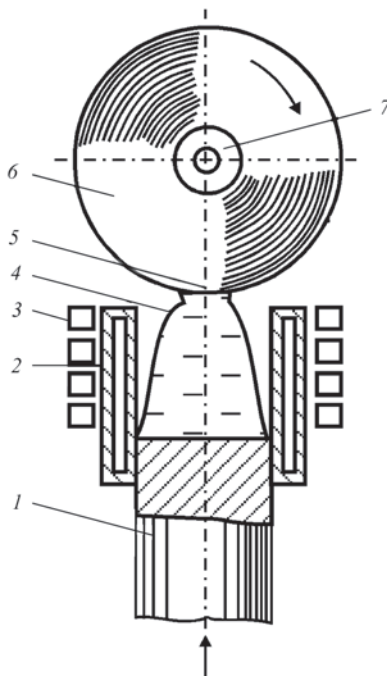


Рис. 7. Схема получения металлических заготовок типа «диск» из расплава: 1 — расходуемая заготовка; 2 — секционный кристаллизатор; 3 — индуктор; 4 — металлическая ванна; 5 — контактная зона заготовки с металлической ванной; 6 — намораживаемая заготовка (диск); 7 — затравка

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 металла.

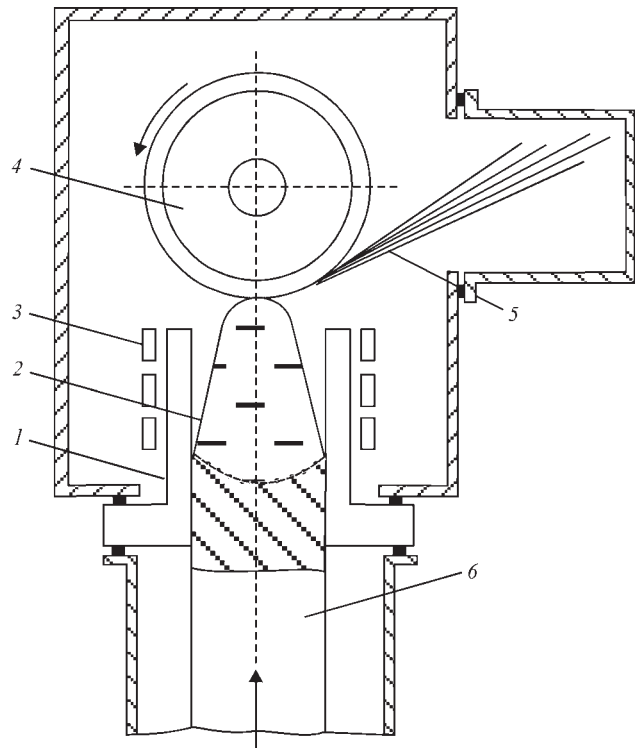


Рис. 8. Схема получения быстроокаленных чешуйчатых материалов: 1 — секционный кристаллизатор; 2 — металлическая ванна; 3 — индуктор; 4 — диск-кристаллизатор; 5 — быстроокаленные чешуйки; 6 — расходуемая заготовка

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 высокорреакционных металлов.

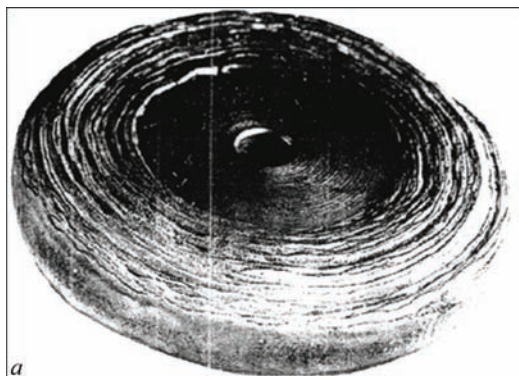


Рис. 9. Внешний вид изделия типа «диск» (а) и макроструктура металла (б)



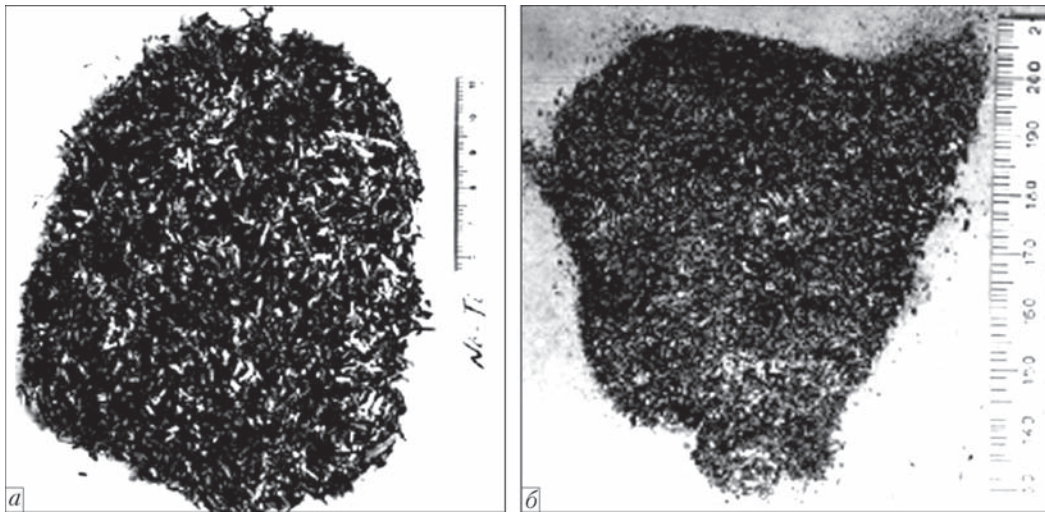


Рис. 10. Быстрозакаленные металлические чешуйчатые материалы: а — сплав системы Ni–Ti (нитинол); б — магнитный сплав системы Nd–Fe–В

Таблица 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 шелевую 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  $1 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^7$  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 расходуемых 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. С. 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. Бібліо-гр. 5, табл. 3, іл. 10.

**Ключові слова:** індукційний нагрів; електромагнітне поле; індуктор; зливко; металева ванна; кристалізація; швидкозагартована 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 Trametal.

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>).