

# ФОРМА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ИЗ РАСПЛАВА ПРИ ИПСК

Д. А. Калашник, Ю. А. Никитенко, В. А. Шаповалов,  
И. В. Шейко, В. Г. Кожемякин, А. В. Веретильник

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

Современные методы получения быстро закаленных материалов позволяют получать их разной геометрической формы: ленты, порошки, чешуйки, микропровода. Форму и размеры данных сплавов обуславливают разные технологические особенности оборудования для получения быстро закаленных материалов. Однако ограниченность в геометрических размерах лимитирует сферу применения получаемых быстро закаленных материалов. Перспективным направлением является производство высокоэнергетических постоянных магнитов, для производства которых необходим порошок или перемолотые материалы. Один из способов получения таких материалов — метод экстракции (диспергирования) из расплава при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе, разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона, позволяющий получать быстро закаленные чешуйки. Представлены экспериментальные данные измерения геометрических размеров чешуек при различных скоростях вращения закалочного диска. Проведен анализ геометрических размеров получаемых материалов методом диспергирования из расплава при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе. Получена зависимость толщины чешуек от скорости вращения закалочного диска. Проанализировано применение чешуек при производстве постоянных магнитов. Библиогр. 5, табл. 1, ил. 3.

*Ключевые слова:* сверхбыстрая закалка; чешуйки; ИПСК; экстракция из расплава; высокорекреационные сплавы; постоянные магниты

**Введение.** На сегодняшний день быстро закаленные материалы нашли широкое применение в электронике, машиностроении, аэрокосмической промышленности и в других отраслях производства. Одновременно с этим форма и геометрические размеры быстро закаленных материалов не являются единообразными и могут быть получены в виде порошка, микропровода, лент, чешуек [1]. Во многом форму и геометрические размеры получаемых быстро закаленных материалов определяет способ их производства. Например, метод Тейлора ограничивается получением микропровода, метод спиннинговая — только лент, распыления — исключительно порошков. Среди перечисленных методов диспергирование расплава при индукционной плавке в секционном кристаллизаторе (ИПСК) несколько расширяет номенклатуру производимых материалов, так как позволяет получать чешуйки и тонкие ленты. Это достигается за счет формы закалочного диска. Если на рабочей дорожке выполнены проточки, получаемые образцы являются чешуйками, если рабочая поверхность гладкая и без проточек, то возможно изготовление тонких лент. Технология ИПСК позволяет получать сплавы высокой чистоты, благодаря отсутствию контакта расплава со стенками тигля и другими огнеупорными материалами.

Разные сферы применения быстро закаленных материалов определяют способ их получения. Для производства сердечников электрических трансформаторов используют исключительно тонкие ленты, при изготовлении постоянных магнитов зачастую применяют аморфные и мелкокристаллические сплавы с размерами соизмеримыми с порошком из-за технологической необходимости в прессовании и спекании. В свете этой проблемы диспергирование из расплава при ИПСК позволяет сократить технологический процесс получения постоянных магнитов из-за того, что чешуйки не нуждаются в порезке, тогда как это необходимо делать с лентами, полученными методом спиннинговая.

Пристального внимания заслуживает производство постоянных магнитов. Сфера их применения с каждым годом увеличивается и становится насущным вопросом о производстве энергетически мощных постоянных магнитов для электромоторостроения, электроники, приборостроения, альтернативной энергетики [2]. К традиционным технологиям получения постоянных магнитов относятся порошковые и литейные методы. В настоящее время альтернативной технологией является способ быстрой закалки из расплава. Главное

преимущество быстрозаленных технологий — возможность управления кристаллической структурой в процессе непосредственной заковки из расплава, а также в ходе дальнейшей термообработки. Альтернативные технологии получения постоянных магнитов могут обеспечить мелкокристаллическую структуру, которая увеличивает значения магнитных свойств производимых магнитов по сравнению со столбчатой, равноосной или монокристаллической. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. Однако, на наш взгляд, технология диспергирования из расплава сочетает в себе относительную простоту оборудования с высоким качеством получаемых материалов.

Технология диспергирования из расплава при ИПСК является перспективным способом получения аморфных и мелкокристаллических сплавов, но на сегодняшний день, пока недостаточно изучена. В ходе предыдущих исследований были получены чешуйки из разных сплавов [3], однако не была установлена зависимость размера чешуек от скорости вращения диска. Целью текущего исследования является решение локальной задачи — определение зависимости между геометрическими размерами чешуек и линейной скоростью вращения закалочного диска.

**Методика проведения эксперимента.** Основная задача данной работы — определить форму и геометрические размеры чешуек при варьировании линейной скорости закалочного диска. Процесс

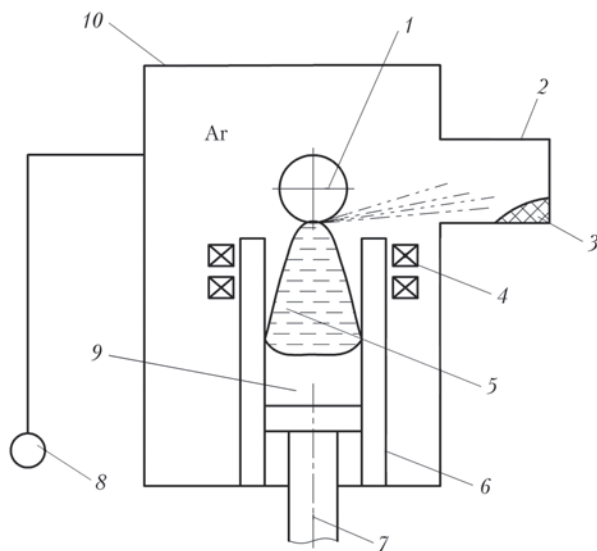


Рис. 1. Процесс диспергирования: 1 — закалочный диск; 2 — бункер; 3 — чешуйки; 4 — индуктор; 5 — расплавленная ванна металла; 6 — секционный кристаллизатор; 7 — поддон; 8 — вакуумный насос; 9 — переплавляемая заготовка; 10 — камера

диспергирования из расплава при ИПСК схематически представлен на рис. 1. В данном эксперименте цилиндрическая заготовка 9 поднимается на уровень индуктора 4, где под действием электромагнитного поля расплавляется и отжимается от стенок секционного кристаллизатора 6. Закалочный диск 1 вращается в диапазоне от 0 до 5000 об/мин.

В качестве фиксированных значений вращения диска выбрали следующие обороты двигателя: 500, 1500, 2500, 3500, 4500 об/мин. В процессе диспергирования применяли диск диаметром 180 мм. В результате линейная скорость составила: 9,4; 28,2; 47; 65,8; 84,6 м/с соответственно. Геометрические размеры полученных чешуек измеряли микрометром и штангенциркулем (выборка из трех образцов).

В качестве исходного материала для получения чешуек использовали сплав железа с содержанием углерода 0,03 %. Вращение закалочного диска осуществляли двигателем постоянного тока. Регулирование скорости вращения производили изменением питающего напряжения. Измеряли реальную скорость вращения с учетом нагрузки на валу (закалочный диск) при помощи энкодера «Autonics E40H».

**Обсуждение результатов.** В результате эксперимента получены образцы разной геометрической формы (рис. 2). Длина всех образцов независимо от линейной скорости вращения диска остается постоянной и составляет 8...12 мм. Данную длину чешуек обуславливают проточки на рабочей дорожке диска [4].

Параметр, который значительно изменяется в зависимости от линейной скорости вращения диска — это толщина чешуек. В таблице представлены результаты измерения толщины чешуек. По усредненным значениям определена зависимость, представленная на рис. 3. В ходе анализа экспериментальных данных установлено, что данная зависимость между толщиной затвердевшего металла и линейной скоростью вращения диска коррелируется с величиной  $R^2 = 0,9996$  к графику затухающей экспоненты вида:

$$y(v) = A_1 \exp\left(-\frac{v}{t_1}\right) + y_0, \quad (1)$$

где  $A_1$  — амплитуда;  $t_1$  — константа затухания;  $y_0$  — константа смещения.

Для подборки коэффициентов к уравнению (1) использовали программный продукт «Origin». В результате определены следующие значения коэффициентов:  $A_1 = 6,49672$ ,  $t_1 = 257,0546$ ,  $y_0 =$

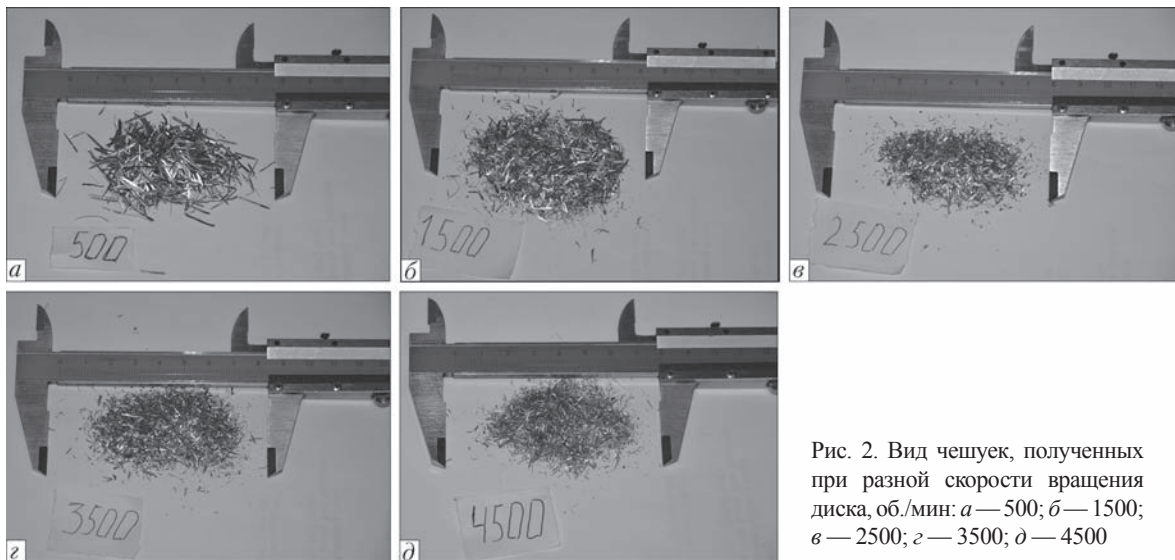


Рис. 2. Вид чешуек, полученных при разной скорости вращения диска, об./мин: а — 500; б — 1500; в — 2500; г — 3500; д — 4500

= 0,037115. В ходе подстановки коэффициентов получено уравнение:

$$y(v) = 6,49672 \exp\left(-\frac{v}{257,0546}\right) + 0,037115. \quad (2)$$

Синтезируя эту зависимость с реальным процессом диспергирования из расплава можно определить физический смысл полученных коэффициентов. Константа смещения  $y_0$  отображает предельно возможную толщину чешуек при линейной скорости вращения диска, стремящегося к бесконечности. В качестве критерия для дальнейшего анализа оптимальных параметров линейной скорости закалочного диска использовали безразмерный коэффициент  $K$  в уравнении (3), где  $y_i$  — толщина чешуек при определенной  $i$ -той линейной скорости вращения диска:

$$K_i = y_i/y_0. \quad (3)$$

Расчетные значения безразмерного коэффициента приведены для каждого значения линейной скорости (таблица). В результате анализа полученных значений можно сделать вывод, что линейная скорость вращения диска, при которой безмерный коэффициент стремится к единице, т. е. приближается к предельно допустимому значению толщины чешуек, и является оптимальной. На основании расчетных значений коэффициента (3) установлено, что оптимальная линейная скорость вращения

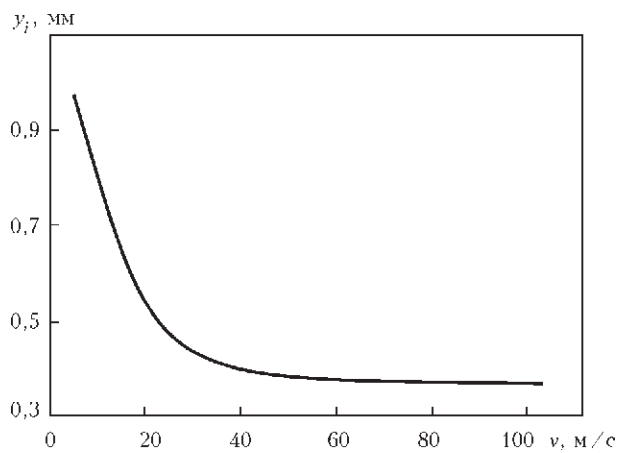


Рис. 3. Зависимость толщины чешуек от линейной скорости вращения закалочного диска

диска находится в диапазоне 65,8...84,6 м/с и дальнейшее увеличение скорости не приведет к существенному изменению толщины чешуек.

Также интересным является случай, когда линейная скорость вращения закалочного диска стремится к нулю. В таком случае уравнение (1) имеет вид:

$$y(v) = A_1 e^0 + y_0. \quad (4)$$

Подставив коэффициенты получим значение  $y(x \rightarrow 0) = 6,533835$  мм, которое отображает максимально возможное значение толщины чешуек при бесконечно малых оборотах закалочного диска.

Расчетные значения безразмерного коэффициента в зависимости от линейной скорости вращения закалочного диска					
Линейная скорость, м/с	Толщина измеряемых чешуек, мм			Усредненное значение толщины образцов, мм	Значение безразмерного коэффициента $K_i$
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3		
9,4	0,07	0,11	0,11	0,97	26,2
28,2	0,03	0,06	0,09	0,06	1,60
47,0	0,05	0,035	0,05	0,045	1,21
65,8	0,045	0,04	0,04	0,041	1,11
84,6	0,04	0,04	0,035	0,038	1,02

Технология, основанная на закалке расплава, является альтернативой традиционной порошковой технологии получения постоянных магнитов и может быть широко использована на практике. Ее преимущества следующие: исключена необходимость работы с дисперсными порошками, а получаемые быстрозакаленные материалы допускают их длительное хранение на воздухе без существенных изменений магнитных свойств и структуры; технология, базируемая на быстрозакаленных материалах, дает возможность получать высокоанизотропные постоянные магниты с высоким значением магнитной энергии [5].

Однако форма и геометрические размеры описывают только общее представление о методе экстракции из расплава при ИПСК. В ходе дальнейших исследований планируется определить зависимость между кристаллической структурой модельных материалов, а также непосредственно магнитных сплавов. Основная задача — определение влияния мелкокристаллической структуры на магнитные характеристики сплава ЮНД 8. Данный сплав относится к семейству магнитных сплавов альнико, которые в настоящее время получают в подавляющем большинстве литьем. Традиционные технологии позволяют получать равноосную, столбчатую или монокристаллическую структуру, а применение технологии быстрой закалки — микрокристаллическую либо аморфную, что должно существенно повлиять на магнитные свойства получаемых образцов.

The advanced methods of producing the rapid-hardening materials allow their manufacture of various geometric shape, such as strips, powders, flakes, microwires. The shape and sizes of these alloys are provided by different technological features of the equipment for the producing of rapid-hardening materials. However, the limit in geometric sizes confines the sphere of application of the produced rapid-hardening materials. The challenging direction is the production of high-energy permanent magnets, for the manufacture of which the powder or grinding materials are necessary. One of the methods of producing these materials is the method of extraction (dispersion) from a melt in induction melting using a sectional mould, developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute, which allows producing rapid-hardening flakes. Experimental data of measuring the geometric sizes of the flakes at different rates of rotation of the hardening disc are presented. Analysis of geometric sizes of the produced materials by the method of dispersion from the melt in the induction melting using a sectional mould was made. The dependence of flake thickness on the rate of the hardening disc rotation was obtained. Application of flakes in production of permanent magnets was analyzed. Ref. 5, Table 1, Figures 3.

**Key words:** *super-rapid hardening; flakes; IMSM; extraction from melt; highly-reaction alloys; permanent magnets*

Поступила 21.07.2016

## Выводы

1. Выявлена экспериментальная зависимость толщины чешуек, получаемых при экстракции из расплава в условиях ИПСК, от линейной скорости вращения закалочного диска. В результате математического анализа экспоненциальной зависимости, определены минимальная и максимальная толщина чешуек.

2. Установлено, что при линейных скоростях вращения диска в диапазоне 65,8...84,6 м/с толщина получаемых чешуек близка к предельной и дальнейшее увеличение скорости не приводит к существенным изменениям геометрических размеров.

1. Анализ технологических особенностей получения быстрозакаленных сплавов / Д. А. Калашник, В. А. Шаповалов, И. В. Шейко [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2015. — № 3. — С. 27–34.
2. Магниты Nd-Fe-B с наноразмерной структурой / В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, Ю. А. Никитенко [и др.] // Там же. — 2014. — № 3. — С. 40–44.
3. Шаповалов В. А. Получение быстрозакаленных сплавов методом диспергирования при ИПСК / В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, Ю. А. Никитенко // Там же. — 2009. — № 3. — С. 32–35.
4. Шаповалов В. А. Некоторые особенности создания устройств для диспергирования металлического расплава / В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, Ю. А. Никитенко // Там же. — 2009. — № 2. — С. 35–38.
5. Новости науки и техники. Серия: Новые материалы, технология их производства и обработки: [реф. сборник / ред.-сост. Я. Л. Линецкий, А. И. Смирнов, О. Х. Фаткуллин]. — М.: ВИНТИ, 1990. — 77 с.