

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции***

23– 25 ноября 2022 г.

Часть 2

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 2 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 410 с. : ил.**

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЬШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

электронно-ионно-плазменным методам обработки / под ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.

14. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.

УДК 669.713.017:538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО СВИНЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИНДУКЦИЕЙ 0,5 ТЛ

Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, aserebrakova87@gmail.com*

***Аннотация.** Проведены механические испытания на ползучесть и микротвердость образцов технически чистого свинца без воздействия и при воздействии внешнего магнитного поля с индукцией 0,5Тл. Получены кривые ползучести и зависимости микротвердости от времени выдержки в магнитном поле, отражающие влияние магнитного поля на процесс ползучести свинца. Произведен расчет скорости ползучести исследуемого материала до и после применения внешнего магнитного поля с индукцией 0,5Тл. Проанализированы показатели по результатам испытаний. Выявлена корреляция скорости ползучести и изменений микротвердости материала, подвергнутого воздействию магнитного поля с магнитной индукции 0,5Тл.*

***Ключевые слова.** Свинец, магнитное поле, ползучесть, микротвердость, пластичность.*

INVESTIGATION OF THE CREEP RATE AND MICROHARDNESS OF COMMERCIALLY PURE LEAD IN A MAGNETIC FIELD WITH INDUCTION 0.5 TL

Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, aserebrakova87@gmail.com*

***Abstract.** Mechanical tests for creep and microhardness of samples technically pure lead were carried out without and under the influence of an external magnetic field with an induction of 0,5 T. Creep curves and microhardness dependences on the holding time in a magnetic field were obtained, reflecting the influence of the magnetic field on the creep process of lead. The creep rate of the material under study was calculated before and after the application of an external magnetic field with an induction of 0,5 T. The indicators based on the test results were analyzed. The correlation of the creep rate and changes in the microhardness of the material subjected to magnetic induction of 0.5 T was revealed.*

Keywords. *Lead, magnetic field, creep, microhardness, plasticity.*

Введение

В настоящее время известны различные способы изменения свойств материалов при помощи воздействия внешней энергии. Одним из видов такой энергии является магнитное поле [1], которое, как показывают исследования способно влиять на структуру и свойства металлов и сплавов [2-3]. Воздействие постоянного магнитного поля позволяет управлять механическими свойствами (прочность, пластичность и твердость) и процессами пластической деформации материала [4-5]. В данной работе предлагается рассмотреть изменение микротвердости и пластичности свинца в процессе ползучести под влиянием магнитного поля с индукцией 0,5 Тл. Ранее были проведены исследования процесса ползучести сплавов алюминия, меди и т.д. [4-7]. Исследований свойств технически чистого поликристаллического свинца при воздействии магнитного поля до 1Тл ранее не проводилось.

Материалы и методы. В исследованиях ползучести использована свинцовая проволока марки С2, диаметром 2 мм. Для испытаний на микротвердость применялись образцы свинца в форме прямоугольного параллелепипеда, высотой 12 мм, шириной 5 мм, длиной 15 мм. Образцы свинца предварительно подвергнутые рекристаллизационному отжигу при температуре 200 °С в течение двух часов, в последующем охлаждались 24 часа до комнатной температуры. В процессе данной процедуры структура поликристаллического свинца была приведена в наиболее однородное состояние.

Испытание на ползучесть осуществлялось с помощью экспериментальной установки на растяжение до разрушения, разработанной и изготовленной в ФГБОУ ВО «СибГИУ» [8]. Установка состоит из жесткого металлического каркаса, в котором установлен источник магнитного поля с измерительной аппаратурой. Сигналы с датчика передаются на ПК и обрабатываются программой. Полученные данные об удлинении образца и времени процесса ползучести позволили построить кривые процесса ползучести. Дальнейший анализ данных производился в Microsoft Excel. При помощи перечисленных инструментов выполнялось выявление линейной (установившейся) стадии ползучести. Линейная стадия ползучести определялась при помощи построения касательной к кривой ползучести находится прямолинейный участок на кривой, тангенс угла наклона данной прямой равен значению скорости ползучести материала.

Величина постоянного растягивающего напряжения была рассчитана путем отнесения усилия, растягивающего образец, к площади сечения образца и составила $\sigma = 5,57 \text{ МПа}$.

Индукция магнитного поля составляла 0,5 Тл. В качестве источника магнитного поля использовался постоянный электромагнит, имеющий возможность регулирования индукции магнитного поля двумя способами: 1) путем изменения силы тока в катушках; 2) путем изменения расстояния между полюсами. В данной работе индукция была отрегулирована с помощью изменения силы тока в катушках. Величина индукции магнитного поля

измерялась миллитесламетром ТПУ. Испытания проводились при комнатной температуре.

При исследованиях микротвердости, образцы располагались в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца с размерами $1,5 \times 1,2$ см и пронизывали ее. Обработку магнитным полем в настоящей работе проводили по четырем режимам. Режим 1, 2, 3 и 4 представляли собой выдержку внутри поля с индукцией 0,5 Тл в течении 1 часа, 2 часов, 3 часов, 4 часов. После чего проводилась процедура микроидентирования, сразу же после выведения образца из поля. Процедура микроиндентирования проводилась на микротвердомере HVS-1000 по Виккерсу. Испытательная нагрузка: 10 г. Время нагружения и под нагрузкой составляло 10 с время разгрузки 5 с. Обработка данных по результатам микроиндентирования выполнена в программах Excel и Origin Pro 8.

Основные результаты. В результате испытаний, набраны статистические данные по процессу ползучести свинца, получены кривые ползучести поликристаллического свинца в обычных условиях и при действии магнитного поля с индукцией 0,5 Тл (рисунок 1).

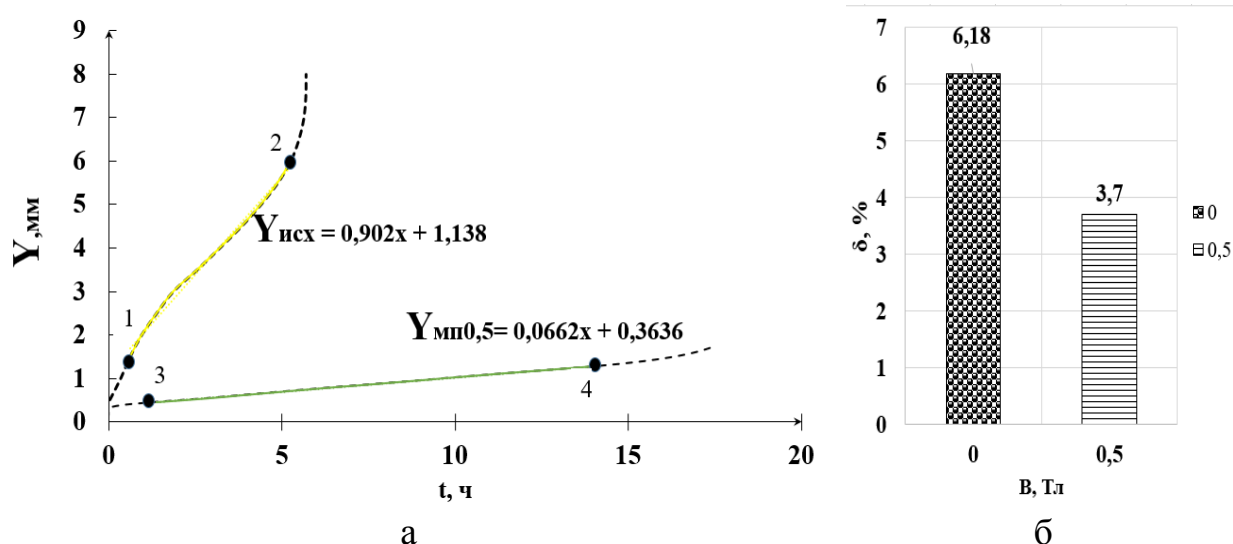


Рисунок 1 - Кривые ползучести поликристаллического свинца в исходном состоянии ($Y_{исх}$) и в МП ($Y_{мп}$) с индукцией $B=0,5$ Тл (а), процент относительной остаточной деформации образцов (б)

На рисунке 1,а представлены кривые ползучести технически чистого поликристаллического свинца в исходном состоянии - $Y_{исх}$, и с воздействием магнитного поля с индукцией 0,5Тл – $Y_{мп}$. Проанализируем полученные результаты.

Линейная стадия на кривой $Y_{исх}$ выявлена на отрезке 1-2, а на кривой $Y_{мп}$ линейная стадия процесса ползучести показана на отрезке 3-4. По данным отрезкам осуществлен расчет скорости ползучести поликристаллического свинца. Среднее значение скорости, рассчитанное по 3 испытаниям на ползучесть в исходном состоянии, составило 0,902 мм/час. Среднее значение скорости ползучести при воздействии магнитного поля с индукцией 0,5 Тл

составило 0,0662 мм/час, что показывает снижение скорости ползучести свинца по сравнению с исходным значением на 97 %. Предположительно, данный эффект обусловлен влиянием магнитного поля на образование и движение дислокаций в образце. Магнитное поле замедляет процесс деформации.

Магнитное поле, применяемое в процессе ползучести свинца С2, повлияло также и на процент относительной остаточной деформации образцов (рисунок 1,б). Деформация образцов до разрушения, не подвергнутых магнитному влиянию в процессе ползучести в среднем составляет 6,18 % (рисунок 1,б). Значение деформации образцов подвергнутых воздействию магнитного поля составило 3,7 %, по сравнению с исходным значением, деформация уменьшилась в 1,6 раз.

Исследования микротвердости технически чистого поликристаллического свинца позволили определить эффект воздействия магнитного поля на материал. Начальный эффект воздействия магнитного поля на материал отражает значения микротвердости, измеренные сразу же после извлечения образца из магнитного поля, изменения которых показывают эффект влияния магнитного поля на значения микротвердости материала. Начальный эффект представлен на рисунке 2.

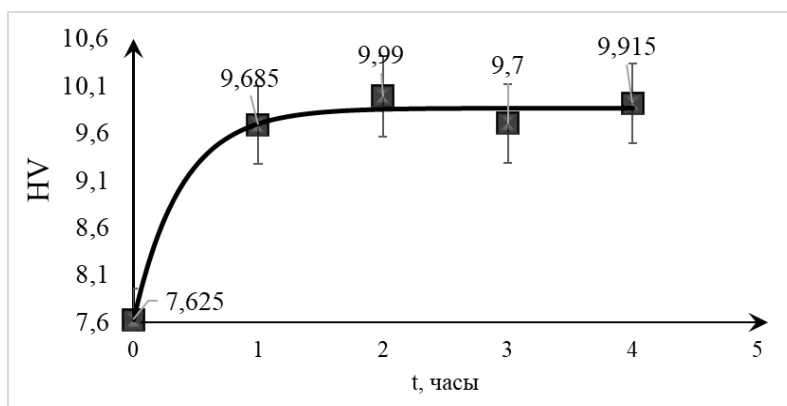


Рисунок 2 - Начальный эффект воздействия магнитного поля на микротвердость свинца С2

Величина микротвердости до обработки свинца составила $HV_0 = 7,6$ (точка 1, рисунок 2). В точках 2-5 представлены значения микротвердости полученные при измерениях сразу после выдержки в магнитном поле в течение 1 часа (точка 2, рисунок 2), 2 часов (точка 3, рисунок 2), 3 часов (точка 4, рисунок 2) и 4 часов (точка 5, рисунок 2).

В течение первого часа нахождения образца в магнитном поле (рис.2, отрезок 1-2), наблюдается резкое увеличение микротвердости до $HV_1 = 9,685$ (точка 2, рисунок 2) на 27,43 %. Далее в точках 2-5 не происходит значительного увеличения значений микротвердости. Максимальное изменение по сравнению с исходным наблюдается после выдержки в магнитном поле в течение 2 часов, $HV_2=9,99$ (точка 3, рисунок 2). Таким образом, начальный эффект влияния магнитного поля с индукцией 0,5Тл выражен увеличением прочности свинца. Это можно объяснить тем, что существует связь прочно-

сти и микротвердости заключается в том, что при испытаниях на микротвердость исследуется сопротивление внедрению в поверхность твердого тела, чем тверже материал, тем сложнее его деформировать. Разрушение материала начинается с образования трещин на поверхности, поэтому чем тверже материал, тем сложнее нанести ему дефект поверхности, а значит сложнее разорвать, сломать или разрушить. Предположительно, одной из возможных причин упрочнения исследуемого материала под воздействием магнитного поля может быть снижение подвижности дислокаций материала [9].

Проанализировав полученные данные по микротвердости, можно отметить что наиболее эффективным является режим 1, в котором образец выдержан в магнитном поле в течении 1 часа с индукцией $B=0,5\text{Тл}$. Дальнейшее увеличение времени выдержки в магнитном поле не приводит к усилению эффекта.

Выводы

В результате испытаний, набраны статистические данные по влиянию магнитного поля на пластические свойства свинца марки С2. В качестве анализируемых характеристик были выбраны микротвердость и скорость ползучести, для оценки пластических свойств свинца и их зависимости от воздействия магнитного поля с индукцией 0,5 Тл. Получены кривые ползучести поликристаллического свинца, которые позволили выявить линейную стадию ползучести и рассчитать скорости ползучести без воздействия магнитного поля и под воздействием. Анализ полученных данных показал, что под воздействием магнитного поля происходит снижение скорости ползучести свинца на 97 % по сравнению с исходной скоростью. Также был рассмотрен процент деформации образцов, разрушенных без воздействия магнитного поля и под воздействием. По сравнению с исходным значением деформация уменьшилась в 1,6 раз. Кроме того, исследования позволили выявить эффект влияния магнитного поля на значение микротвердости. Микротвердость образца, подвергнутого влиянию магнитного поля, увеличивается. Максимальное увеличение происходит в течение 1 часа воздействия. Микротвердость после 1 часа увеличивается на 27, 43 % по сравнению с исходным значением. Выявлено, что при последующей выдержке в магнитном поле, значение микротвердости остается на одном уровне. На основании этого, можно сделать вывод о том, что эффект влияния магнитного поля с индукцией 0,5 Тл на свинец не зависит от времени выдержки в нем исследуемого материала. Таким образом, наблюдается корреляция анализируемых характеристик, которые позволяют сделать вывод о том, что воздействие магнитного поля на поликристаллический свинец приводит к упрочнению материала, снижению подвижности дислокаций и меньшей остаточной деформации образцов.

Библиографический список

1. Ida, N. The Static Magnetic Field / N. Ida // In book: Engineering Electromagnetics. 2021. - pp.377-418.
2. Cai, Q. Effects of magnetic field on the microstructure and mechanical property of Mg-Al-Gd alloys / Q. Cai, C. Zhai, Q. Luo, T.-Y. Zhang// Materials

Characterization. 2019. - № 154. - pp. 233-240

3. Bilal N., Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of austempered 70Si3MnCrsteel / N. Bilal, L.Xiaoyan, Y. Zhinan, Z. Jiali, Z. Fucheng, L. Junkui // Materials Science and Engineering: A. -2019. - V.759.-pp. 11–18.

4. Загуляев, Д.В. Закономерности изменения деформационного поведения поликристаллической меди после магнитной обработки / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, Н.Г. Литвиненко (Ярополова), В.Е. Громов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. - Т.18. - №4-2. - С. 1763-1766.

5. Загуляев, Д. В. Влияние слабого магнитного поля на пластичность алюминия А85 / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, М.В. Пономарева [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. - 2010. - Т.15. - № 3-1. - С.820-821

6. Pshonkin D.E., Effect of static magnetic fields on creep of aluminum alloy / D.E. Pshonkin // Solid state phenomena.2017. - № 269. - pp. 1-6.

7. Скворцов, А.А. Влияние магнитного поля на ползучесть алюминиевого сплава с Fe-содержащими включениями/ А.А. Скворцов, Д.Е. Пшонкин // «ФППК – 2018»: Тез. докл. междунаrodn. конф. Черноголовка. 2018. - С.91.

8. Коновалов, С. В. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов / С. В. Коновалов, В. И. Данилов, Л. Б. Зуев и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. - № 8. – С. 64 – 66.

9. Альшиц, В. И. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля / В. И. Альшиц [и др.]. // ФТТ. – 1987. – № 2. – С. 467–471.

УДК 669.15:620.186:539.12

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕДИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С ОСНОВОЙ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКЕ

**Будовских Е.А., Романов Д.А., Филяков А.Д.,
Башенко Л.П., Ионина А.В.**

***Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, budovskikh@mail.ru***

Аннотация. Методами световой и растровой электронной микроскопии выявлено, что при электровзрывной обработке меди в зоне термического влияния происходит растрескивание по границам зерен с заполнением трещин материалом взрываемого проводника (углеродных волокон и металлической фольги). Проведено обсуждение и предложен механизм наблюдае-

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ И РАДИУСА РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ИНСТРУМЕНТА НА ОБРАЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МИКРОСТРУКТУРУ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Джигвишов В.Ф., Рзаев Э.Д.</i>	98
МИКРОСТРУКТУРА КЕРАМИКИ V_4C-CrV_2 , СИНТЕЗИРОВАННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОВОЛОКНИСТОГО УГЛЕРОДА	
<i>Дик Д.В., Гудыма Т.С., Филипов А.А., Крутский Ю.Л.</i>	107
ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛЮСА НА ОСНОВЕ ШЛАКА СИЛИКОМАРГАНЦА И ФД-УФС	
<i>Крюков Р.Е., Михно А.Р., Жуков А.В., Бендре Ю.В.</i>	114
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО СВИНЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИНДУКЦИЕЙ 0,5 ТЛ	
<i>Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В.</i>	121
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕДИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С ОСНОВОЙ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКЕ	
<i>Будовских Е.А., Романов Д.А., Филяков А.Д., Бащенко Л.П., Ионина А.В.</i>	126
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА ПУТЕМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНО СОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОШОК ТИТАНА	
<i>Киселев П.В., Комаров А.А., Михно А.Р., Дробышев В.К.</i>	131
ОБ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ БЕСКИСЛОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМАХ V_4C-MeV_2 ($Me = Ti, Cr, Zr$)	
<i>Гудыма Т.С., Крутский Ю.Л., Крутская Т.М., Дик Д.В., Шестаков А.А., Апарнев А.И., Логинов А.В.</i>	138
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ	
<i>Непочатов Ю.К., Плетнев П.М.², Гудыма Т.С.</i>	143
ПЕРСПЕКТИВЫ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ МЕТОДОМ ЭШН	
<i>Быстров В.А.</i>	149
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВА AL7075 ПОСЛЕ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ	
<i>Дробышев В.К., Михно А.Р., Панченко И.А., Лабунский Д.Н.</i>	158
СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Mo–Au	
<i>Филяков А.Д., Романов Д.А., Соснин К.В., Московский С.В.</i>	162
ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПРОКАТА ИЗ ОТБРАКОВКИ ЗАГОТОВОК РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В.</i>	168