Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

Посвящается 100-летию
со дня рождения ректора СМИ,
доктора технических наук,
профессора Н.В.Толстогузова

МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО

«Металлургия – 2021»

Труды
XXII Международной научно-практической конференции

10 – 11ноября 2021 г.

Часть 1

Новокузнецк
2021

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЕМ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ
Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А. ***163***

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЧУГУНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА
Усольцев А.А., Князев С.В., Куценко А.И., Козырев Н.А., Дмитриенко В.И. ***167***

ОЦЕНКА ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ЧУГУНОВ ВЧ50 И ЧХ3
Дмитриенко В.И., Князев С. В., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А. ***177***

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ХН65ВМТЮ (ЭИ896) МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ
Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чэнь Д., Панченко И.А. ***184***

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ
Кузнецов Р.В., Громов В.Е, Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Кормышев В.Е., Перегудов О.А., Семин А.П. ***189***

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ И МЕДИ
Попова М.В., Жибинова И.А., Прудников А.Н. ***194***

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ ВЫСОКОЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА 008ЖР
Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В. ***201***

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Сагалакова М.М., Черныш А.П., Жибинова И.А., Малюх М.А. ***208***

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А0 С НИЗКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОРАБОТКИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ
Яшин В.В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А. ***212***

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫКАТЫВАЕМОСТИ ДЕФЕКТОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА
Уманский А.А., Юрьев А.Б. ***216***

МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СВОЙСТВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
Арышенский Е.В., Коновалов С.В. ***225***

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЛИТЬЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ SI ЛЕГИРОВАННОГО МАЛЫМИ ZR, SC ДОБАВКАМИ
Лапшов М.А, Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю. ***232***

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 9CRMOV-N ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
Осинцев К.А., Шляров В.В., Чэнь С., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Чаплыгин К.К. ***240***

ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНОЙ РЕЛЬСЫ С УСКОРЕНИЕМ
Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С. ***248***

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ ПО ТОЛЩИНЕ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ (ФАЗЫ) ПРИ ВЛИЯНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО НИКЕЛЯ НА ДИФФУЗИОННЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ
Розенштейн Е.О., Бондарева О.С., Коновалов С.В. ***255***

УДК 669.13:621.753.5

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Афанасьев В.К. [1], Попова М.В. [1], Долгова С.В. [1], Сагалакова М.М.[2],Черныш А.П.[3], Жибинова И.А.[4], Малюх М.А.[1]

[1]Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, m.popova@rdtc.ru
[2]Хакасский технический институт-филиал ФГАОУ ВО СФУ, Абакан, Россия
[3] Кемеровский НИИ-филиал СФНЦА РАН, Кемерово, Россия
[4]Кузбасский гуманитарно-педагогический институт КемГу, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Изучено влияние микроструктуры доменного чугуна после обработки расплава и последующей циклической деформации. Установлено, что термоциклическая обработка расплава в интервале 1100–1200 °С позволяет полностью подавить процесс графитизации и получить ледебуритную структуру. Показано, что для чугуна без выделений графита возможно проведение горячей термоциклической деформации. Исследовано воздействие циклической ковки на микроструктуру пластин из чугуна без выделений графита.

Ключевые слова: доменный чугун, микроструктура, графит, ледебурит, обработка расплава, пластическая деформация, ковка.

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF BLAST FURNACE IRON AFTER THERMOCYCLIC TREATMENT

Afanasyev V.K. [1], Popova M.V. [1], Dolgova S.V. [1], Sagalakova M.M.[2], Chernysh A.P.[3], Zhibinova I.A.[4], Malyukh M.A.[1]

[1]Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation, e-mail: m.popova@rdtc.ru
[2] Khakas Technical Institute-Branch of FSAOU VO SFU, Abakan, Russian Federation
[3] Kemerovo Research Institute-Branch of SFNCA RAS, Kemerovo, Russian Federation
[4]Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute KemGu, Novokuznetsk, Russia

Abstract. *The influence of the microstructure of blast furnace cast iron after melt treatment and subsequent cyclic deformation has been studied. It is established that the thermocyclic treatment of the melt in the range of 1100-1200 ° C makes it possible to completely suppress the graphitization process and obtain a ledeburite structure. It is shown that hot thermocyclic deformation is possible for cast iron without graphite emissions. The effect of cyclic forging on the microstructure of cast iron plates without graphite emissions is investigated.*

Keywords: *blast furnace cast iron, microstructure, graphite, ledeburite, melt treatment, plastic deformation, forging.*

Согласно данным Всемирной ассоциации производителей стали (World Steel Association, WSA), мировое производство чугуна в 2019 году составило 1 281 998 тонн [1]. Основная часть доменного чугуна предназначена для передела в сталь, однако в последнее время проводится все больше исследований, связанных с разработкой технологических приемов, позволяющих использовать доменный чугун в качестве конструкционного или инструментального материала [2–6]. Это объясняется его хорошими технологическими свойствами и низкой стоимостью. Традиционно изделия из чугуна получают методами литья, т.к. он имеет низкую технологическую пластичность. Исследования последних лет и в нашей стране, и за рубежом показывают, что белый чугун, а также чугун с шаровидной формой графита при определенных температурно-

силовых параметрах можно пластически деформировать [7–10]. Однако в проведенных работах в основном рассмотрены либо легированные белые чугуны, либо высокопрочные чугуны с шаровидной формой графита, поэтому представляет интерес исследование влияния пластической деформации на микроструктуру и свойства обычного чугуна, в структуре которого выделения графита удалены после обработки расплава.

Исходя из указанного и на основании разработанных нами ранее приёмов пластической деформации и термической обработки, было проведено изучение возможностей получения деформированной заготовки из доменного чугуна [11, 12].

Доменный передельный чугун П1 производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в виде чушек весом 16 кг расплавляли в индукционной печи ИСП-006 и проводили обработку расплава. До переплава и обработки расплава чугун имел следующий химический состав, масс. %: углерод 4,15; кремний 0,90; марганец 0,30; фосфор 0,10; сера 0,02, железо – остальное. Обработку расплава чугуна осуществляли тремя способами: влажными графитовыми блоками и фторопластом в интервале 1200–1500 °С путем циклического введения порций реагента, а также путем циклического изменения температуры в интервале 1100–1200 °С. Пробы заливали в алюминиевый и медный кокиль размерами 80×80×450 мм. Из полученных заготовок нарезали темплеты и изучали микроструктуру от дна до прибыльной части слитка.

Изучение микроструктуры чугуна осуществляли с помощью оптического микроскопа OPTON при увеличении ×110. Механические свойства образцов определяли по стандартным методикам. Статистическую обработку результатов механических испытаний проводили по известным методикам проверки статистических гипотез и вычисления выборочных числовых характеристик при малом объеме выборки (n<50) в режиме «Описательная статистика» Microsoft Excel. Термическую обработку проводили в электропечах сопротивления типа СНОЛ.

Проведено систематическое исследование изменений микроструктуры образцов из донной и прибыльной частей слитков без и с обработкой расплава. Было установлено, что в структуре слитков чугуна без обработки расплава во всех случаях присутствуют выделения графита и распределение его по сечению слитка неравномерно. Количество выделений графита увеличивается от дна к прибыльной части. Максимальное количество выделений во всех частях слитка наблюдалось в центральной зоне. Было проведено систематическое исследование изменений микроструктуры образцов из донной и прибыльной частей после нагрева в интервале 20–1000°С. Установлено, что, начиная с температуры 700°С уменьшается травимость ледебурита, при этом увеличивается травимость графитовых выделений и прилегающих к ним областей. Характерной особенностью является увеличение размеров графитовых выделений. Согласно результатам металлографического анализа, проведение качественной пластической деформации слитков с такой структурой маловероятно, так как графитовые выделения являются готовыми очагами зарождения и распространения трещин. Несмотря на это, в условиях кузнечного цеха была сделана попытка получить деформированную заготовку. Деформации подвергались слитки, предварительно отожженные при 800, 900°С и литые. Микроструктура литого чугуна и результаты деформации показаны на рисунке 1.

а б

Рисунок 1 – Микроструктура литого доменного чугуна без обработки расплава, ×110 (а) и общий вид деформированной заготовки (б)

Проведенные эксперименты по применению традиционных способов выплавки и деформации чугуна и невозможность получения качественной деформированной заготовки позволили сделать заключение о необходимости применения различных способов обработки расплава с целью устранения выделений графита в структуре чугуна и повышения его де-

формируемости.

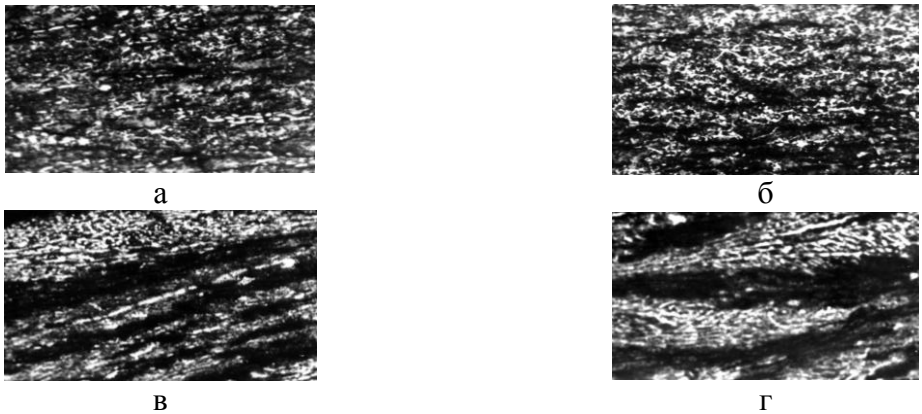
Обработку чугуна проводили веществами, изменяющими соотношение элементов внедрения в расплаве и, соответственно, влияющими на условия образования графитовых включений [5]. Графитовый блок периодически вводили в расплав и выдерживали в течение 10 минут. Суммарное время обработки расплава вращающимся сырым графитовым блоком изменяли от 10 минут до 1 часа. Установлено, что такая обработка резко уменьшает зону графитовых выделений, но полностью её не устраняет. Без обработки расплава графитовые выделения наблюдались даже в краевых зонах слитка. После указанной обработки расплава в слитке графитовые выделения наблюдаются только в узкой центральной зоне. Обработку расплава полимером тетрафторэтилена C_2F_4 проводили шестикратно в количестве 0,1 и 0,2 % от веса расплава в течение 15 минут. Установлено, что полимер тетрафторэтилена благоприятно влияет на формирование структуры слитка. В этом случае даже в центральной зоне слитка отсутствуют выделения графита и образуется ледебуритная структура.

С целью более полного удаления выделений графита во всех зонах слитка проводили термоциклическую обработку расплава в интервале 1100–1200 °С. Расплавленный в индукционной печи чугун подвергался многократному расплавлению и кристаллизации. В соответствии с широко известными закономерностями растворения газов в металле при переходе твердое→жидкое и жидкое→твердое уменьшалось газосодержание, в связи с чем процесс графитизации резко замедлялся. В термоциклированном чугуне при любом способе его кристаллизации выделения графита не образуются, по всему сечению слитка наблюдается тонкодисперсная ледебуритная структура. Важно отметить, что после 4–6 циклов такой обработки содержание углерода в чугуне практически не уменьшалось, а твердость несколько снижалась (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние термоциклической обработки расплава на содержание углерода и твердость доменного чугуна

Количество циклов ТЦО	–	1	2	3	4	5	6
Содержание С, %	4,20	4,82	4,65	4,39	4,20	4,19	4,17
Твердость НВ, МПа	4600	5100	4500	4350	4200	4100	4000

Было изучено влияние указанных видов обработки расплава на формирование структуры слитков размерами h = 15 мм и *l* = 250 мм. Удлинённые слитки малой толщины с ледебуритной структурой без выделений графита подвергались циклической ковке на 3-х тонном молоте в кузнечном цехе. Получены качественные деформированные заготовки в виде пластин толщиной 5 мм. Микроструктура их приведена на рисунке 2. Металлографический анализ показал, что в центральной части поковок формируется мелкодисперсная структура без выраженной преимущественной геометрической ориентировки ледебуритных колоний, в отличие от краевых зон, где наблюдается их строчечное расположение.



а б в г

Рисунок 2 – Микроструктура кованых заготовок из доменного чугуна после термоциклической обработки расплава, ×110: а, б – центральная часть; б, в – краевые зоны

Затем кованые пятимиллиметровые пластины подвергали многократной циклической горячей прокатке до толщины 0,5–0,3 мм. Таким образом, была установлена принципиальная возможность получения фольги из доменного чугуна. Количество циклов горячей деформации составляло от 6 до 10. Общий вид кольца из фольги доменного чугуна, и микроструктура фольги представлены на рисунке 3. Механические свойства фольги определяли после горячей циклической прокатки и последующего охлаждения на воздухе. Установлено, что временное сопротивление деформированного чугуна после 6–10 циклов горячей прокатки находится в пределах σ_B = 500–800 МПа при НВ = 2000–2200 МПа.

а б

Рисунок 3 – Кольцо из фольги доменного термоциклированного чугуна (а) и микроструктура фольги ×110 (б)

Выводы:

1. Изучено влияние различных способов обработки расплава на структуру и свойства передельного чугуна. Выявлены перспективные способы обработки расплава и термоциклической деформации, обеспечивающие возможность получения поковок из передельного чугуна.

2. Установлена принципиальная возможность получения фольги из доменного термоциклированного чугуна с пределом прочности 500 – 800 МПа и твердостью НВ=2000–2200 МПа после горячей циклической ковки и прокатки. Следует считать целесообразным дальнейшее проведение работы с целью изучения воздействия различных факторов на свойства деформированного чугуна.

Библиографический список

1. Steel Statistical Yearbook: 2020 concise version [Электронный ресурс]. – Режим доступа:https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:5001dac8-0083-46f3-aadd-35aa357acbcc/Steel%25 20Statistical% 2520Yearbook%25202020%2520%2528concise%2520version%2529.pdf. – 46 с.

2. Афанасьев В.К. Доменный чугун – металл будущего / В.К. Афанасьев, С.А. Гладышев, Л.А. Годик, А.А. Золотовский, А.И. Катунин, В.Я. Келлер, Н.М. Кулагин, Б.А. Кустов, В.А. Москинов, Л.М. Полторацкий, М.В. Попова, А.В. Сочнев, Ю.А. Селезнев, А.Н. Смирнов, В.Н. Толстогузов, М.А. Усов, В.Я. Целлермаер, М.В. Чибряков, В.И. Чичков. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2005.–343 с.

3. Machining of Hard Materials: Provides a discussion of recent advancements in hard machining / Editors Davim, J. Paulo – London: Springer-Verlag London Limited. – 2011. – 211 p.

4. Афанасьев В.К. Быстрорежущая сталь и инструментальный чугун / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, С.В. Магазов, А.В. Кольба, А.П. Черныш. – под научн. ред. проф. Афанасьева В.К. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 630 с.

5. Афанасьев В.К. Металлография чугуна / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, М.М. Сагалакова, А.О. Токарев, В.Н. Толстогузов, В.В. Герцен, А.П. Черныш. – под научн. ред. проф. Афанасьева В.К. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 482 с.

6. Афанасьев В.К. Доменный чугун без выделений графита – новый материал многоцелевого назначения / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.В. Кольба, М.М. Сагалакова, Г.Е. Громов, А.В. Сочнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2003. – № 2 (18). – С. 14-16.

7. Покровский А.И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А.И. Покровский. – Минск: «Беларуская навука», 2010. – 256 с.

8. Алифанов А.В. Применение горячедеформированного хромованадиевого белого чугуна для получения дереворежущего инструмента / А.В. Алифанов // Литьё и металлургия.

– 2012. – №3 (67). – С. 157–161.

9. Sjögren T. Analysing the Deformation Behaviour of Compacted Graphite Cast Irons Using Digital Image Correlation Techniques / Torsten Sjögren, Per Eric Persson, Peter Vomacka // Key Engineering Materials (Volume 457). – 2010. – P. 470-475. – DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.457.470.

10. Öberg C. Plastic Deformation and Creep of Two Ductile Cast Irons, SiMo51 and SiMo1000, during Thermal Cycling with Large Strains / Christian Öberg, BaoHua Zhu, Stefan Jonsson // Materials Science Forum (Volume 925). – 2018. – P. 361-368. – DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.361.

11. Афанасьев В.К. О термической обработке инструмента из доменного белого нелегированного чугуна / В.К. Афанасьев, А.П. Черныш, М.В. Попова, М.М. Сагалакова, К.Г. Малютин // Металлургия машиностроения. – 2020. – № 3. – С. 32-36.

12. Афанасьев В.К. Некоторые итоги и перспективы развития нелегированного высокопрочного чугуна / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.П. Черныш, С.В. Долгова, К.Г. Малютин, М.М. Сагалакова // Металлургия машиностроения. – 2020. – № 4. – С. 11-16.

УДК 669.017

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А0 С НИЗКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОРАБОТКИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ

Яшин В.В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия, **vasiliy.yashin@arconic.com**

Аннотация. *Работа посвящена исследованию эволюции структуры в образцах алюминия марки А0 с низкой степенью проработки литой структуры при обработке металла прокаткой в диапазоне температур 300÷500 ℃. Получена аналитическая запись, описывающая кинетику рекристаллизации. Установлено влияние степени деформации и параметра Зенера-Холломона на кинетику рекристаллизации при последующем отжиге.*

Ключевые слова: *рекристаллизация, алюминиевые сплавы, уравнение Аврами, размер зерна.*

INVESTIGATION OF RECRYSTALLIZATION KINETICS ON ALUMINUM A5 ALLOY AFTER ITS AS CAST STRUCTURE ELABORATION

Yashin V.V., Aryshenskii E.V., Konovalov S.V., Aryshenskii V.Yu.
Samara National Research University,
Samara, Russia, vasiliy.yashin@arconic.com

Abstract. *The article is devoted to the study of the evolution of the grain structure in aluminum during the elaboration of the as cast structure in the temperature range of 300 ÷ 500 ℃. An analytical equation describing the recrystallization kinetics has been obtained. The effect of the deformation degree as well as Zener-Hollomon parameter on the recrystallization kinetics of during subsequent annealing was established.*

Key words: *recrystallization, aluminum alloys, Avrami equation, intermetallic compounds, grain size.*

Алюминий и сплавы на его основе являются незаменимым материалом во многих областях современной промышленности. На долю листовой продукции получаемой сначала горячей, а затем холодной прокаткой приходится значительный объем рынка [1]. Ключевым параметром, влияющим на свойства алюминиевого проката, является его кристаллографическая структура [2-4]. Среди процессов, которые сильно влияют на эволюцию кристаллогра-