

УДК 621.771.23:669.715

**ВЛИЯНИЕ КАЛЬЦИЯ НА АНИЗОТРОПИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Si**

**EFFECT OF CALCIUM ON THE ANISOTROPY OF THE MECHANICAL PROPERTIES
Of ALUMINIUM ALLOY SHEET SYSTEM Al–Mg–Si**

©Гуреева М. А.

канд. техн. наук

Российский Новый Университет» (РосНУ)

г. Москва, Россия, tag1706@mail.ru

©Gureeva M.

Ph.D., Russian New University (Rosnou)

Moscow, Russia, tag1706@mail.ru

©Грушко О. Е.

д-р техн. наук

Московский политехнический университет

г. Москва, Россия, vogozar@mail.ru

©Grushko O.

Dr. habil., Moscow Polytechnical University

Moscow, Russia, vogozar@mail.ru

©Овчинников В. В.

д-р техн. наук

Московский политехнический университет

г. Москва, Россия, vikov1956@mail.ru

©Ovchinnikov V.

Dr. habil., Moscow Polytechnical University

Moscow, Russia, vikov1956@mail.ru

Аннотация. Выполнено исследование анизотропии механических свойств плоского проката (листов) из сплава АВ без легирования и с легированием кальцием. Цель работы состояла в определении влияния легирования кальцием сплава АВ в условиях горячей прокатки, закалки и искусственного старения на изменение механических свойств сплава в различных направлениях. Выявлены возможности управления степенью анизотропии механических свойств листов сплава АВ при его легировании кальцием. Получены практически равные значения механических свойств образцов, вырезанных под разными углами к направлению прокатки.

Abstract. Made a study of anisotropy of mechanical properties of flat-rolled products (sheets) of alloy AB without doping and with extra calcium. The aim of this work was to determine the influence of alloying calcium alloy AB in hot rolling conditions, quenching and artificial ageing on the change of mechanical properties of the alloy in different directions. Identified opportunities to control the degree of anisotropy of mechanical properties sheet of alloy AB when its alloying calcium. Received almost equal values of mechanical properties of samples, cut at different angles to the direction of rolling.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сплавы системы Al–Mg–Si, горячая прокатка листов, закалка, искусственное старение, механические свойства, анизотропия, рекристаллизация.

Keywords: aluminum alloys, alloys Al–Mg–Si, hot-rolled sheets, hardening, artificial aging, mechanical properties, anisotropy, recrystallization.

Применяемая технология получения листов из алюминиевых сплавов включает изготовление слитков методом литья с последующей прокаткой, которая осуществляется в условиях неоднородного поля напряжений и температур, а также последующую термическую обработку (закалка, искусственное старение, естественное старение). Указанная технология приводит к анизотропии механических свойств листов в конечном состоянии.

В ряде публикаций показано, что деформированные полуфабрикаты из алюминиевых сплавов в виде плоского проката обладают определенным уровнем анизотропии механических свойств, который может варьироваться в зависимости от режимов термомеханической обработки [1–3]. В публикации [4] обращено внимание на то, что при горячей прокатке алюминиевого сплава серии 3000 происходит накопление доли предпочтительных ориентировок по проходам прокатки, несмотря на наличие времени междеформационных пауз, поскольку в процессе горячей прокатки схема деформации практически не меняется, что может приводить к нарастанию анизотропии свойств.

В работе [5] описаны механические свойства горячепрессованных полуфабрикатов из сплава системы Al–Mg–Si, практически изотропные на всех стадиях обработки, за исключением заготовок из вторичных материалов. В последнем случае после закалки и искусственного старения вдоль оси полуфабриката относительное удлинение оказалось равно 11%, а поперек оси 7%, т. е. выявлена анизотропия пластических свойств, которая не формировалась только после закалки.

Авторами статьи [5, 6] введено понятие показателя деформационной анизотропии применительно к алюминиевому сплаву 1561, этот показатель оказался выше, а анизотропия, соответственно, больше при уменьшении скорости деформации в интервале температуре 250–500 °С, причем при температуре 420 °С наблюдался максимум проявления анизотропии.

Приведены свойства сплава серии 7000, которые иллюстрируют факт формирования повышенных прочностных свойств (временного сопротивления и предела текучести) в продольном направлении по отношению к поперечному. Такая же тенденция наблюдается и для пластического свойства (относительного удлинения) [6].

В результате исследований [7] установлено влияние внешнего трения при прокатке алюминиевого сплава серии 3000 на формирование текстуры. Отражено влияние времени старения на качественную смену параметров деформационной анизотропии для сплава 6061. Но при 200 °С и времени старения около 80 мин можно получить практически изотропное состояние, по крайней мере, для ортогональных направлений измерения свойств.

В статье [8] отражено влияние скорости деформации на механические свойства сплава 6061 при прессовании труб.

В работе [9] представлены исследования влияния скорости прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава АД33. В результате проведения промышленного эксперимента по горячей прокатке алюминиевого сплава 6061 выявлены изменения степени анизотропии листов на уровне различий в механических свойствах: временного сопротивления, условного предела текучести, относительного удлинения до разрыва. Установлены следующие закономерности. В состояниях после прокатки, закалки и старения временное сопротивление и условный предел текучести максимальны поперек направления прокатки и минимальны под углом 45 °.

Относительное удлинение до разрыва максимально в направлении прокатки после закалки и под углом 45° в состаренном состоянии. Но оно минимально поперек направления прокатки. Наибольшее приближение к изотропным свойствам наблюдается в горячекатаном состоянии.

Снижение скорости прокатки приводит к большему упрочнению непосредственно после прокатки, но оно не сказывается на свойствах проката в термоупрочненном состоянии [9]. Указанная технология производства плоского проката при снижении анизотропии механических свойств негативно сказывается на производительности оборудования.

Задачей настоящего исследования является установление закономерностей проявления анизотропии при прокатке и термообработке плоских полуфабрикатов из сплава АВ с легированием и без легирования кальцием.

Для оценки изотропности листов толщиной 1,5 мм были проведены испытания механических свойств на образцах, ориентированных под различными углами к направлению оси прокатки. Заготовки испытывали в состоянии Т (закалка и естественное старение) и Т1 (закалка и искусственное старение).

Химический состав исследуемых сплавов приведен в Таблице 1.

Таблица 1.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИССЛЕДУЕМЫХ СПЛАВОВ

Маркировка сплава	Содержание элементов, % по массе					
	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Ca
1 (AB)	0,72	0,43	0,11	0,12	0,15	—
2	0,75	0,45	0,12	0,17	0,14	0,15
3	0,77	0,40	0,13	0,15	0,14	0,024

Исследование микроструктуры в литом состоянии показало, что по границам дендритных ячеек располагается избыточная неравновесная эвтектика, содержащая Mg_2Si , грубые первичные интерметаллиды при этом отсутствуют. Гомогенизационный отжиг слитков по стандартному для сплава АВ режиму приводит к растворению Mg_2Si . Гомогенизированные слитки были прокатаны в горячую до толщины 8,0 мм. После горячей прокатки без предварительного и промежуточных отжигов заготовки были прокатаны в холодную до толщины 1,5 мм.

Анализ микроструктуры листов трех исследуемых составов показал заметное различие, как по размеру зерна, так и по характеру самой структуры (Рисунок 1).

Зерна в сплаве 1 (без кальция) значительно крупнее, чем в сплаве 2 (содержание кальция 0,14%), соответственно ~ 150 и ~ 30 мкм, они имеют более равноосную (полигональную) форму. Все это указывает на то, что в материале листа из сплава 1 прошла собирательная рекристаллизация. Зерна в сплаве 2 более вытянуты. Размер зерна в листе состава 3 составляет более 100 мкм.

Зерна в сплаве 1 (без кальция) значительно крупнее, чем в сплаве 2 (содержание кальция 0,14 %), соответственно ~ 150 и ~ 30 мкм, они имеют более равноосную (полигональную) форму. Все это указывает на то, что в материале листа из сплава 1 прошла собирательная рекристаллизация. Зерна в сплаве 2 более вытянуты. Размер зерна в листе состава 3 составляет более 100 мкм.

Для установления влияния легирующей добавки кальция на формирование текстуры был проведен анализ текстурных компонент, формирующихся в листах в поверхностной части и на глубине $1/4$ по толщине.

В средней части сечения листов всех сплавов отмечено присутствие октаэдрической ориентировки сдвигового типа $\{111\}-\langle 011 \rangle$, которая выражена наиболее отчетливо в сплаве 2 (содержание кальция 0,15 %).

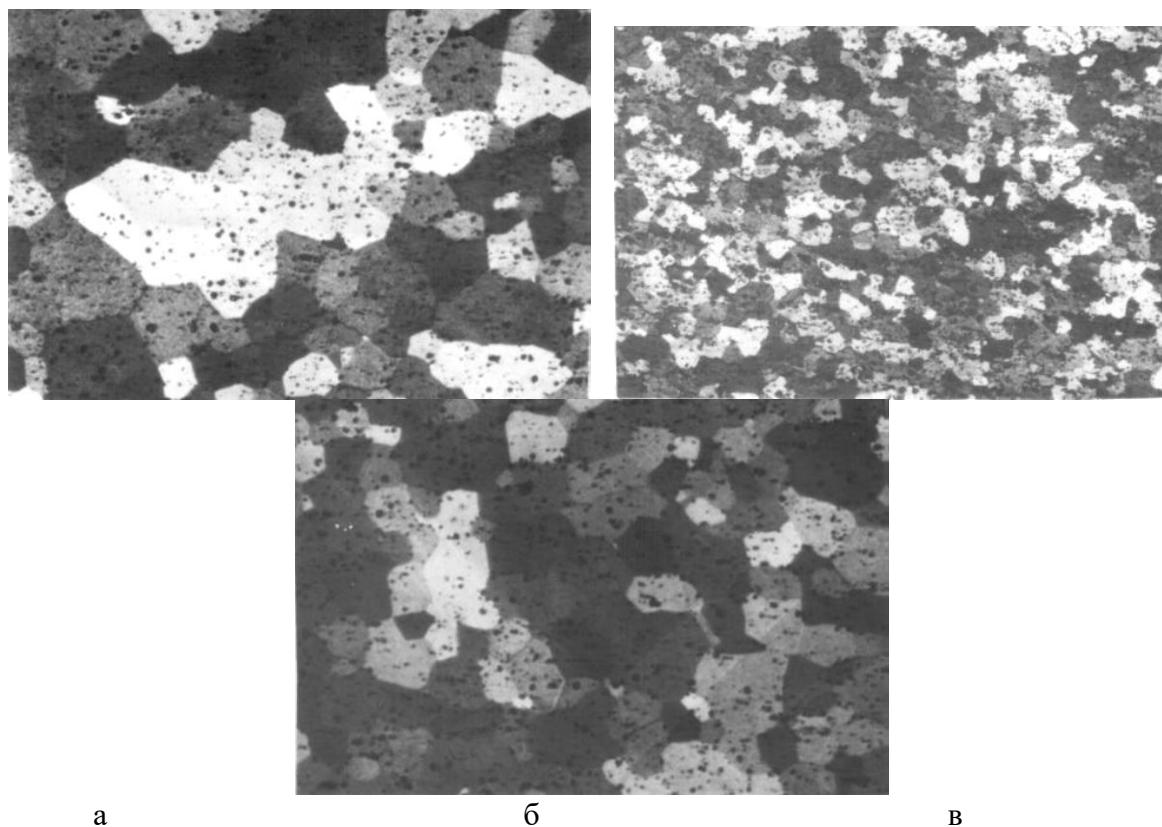


Рисунок 1. Структура листов с различным содержанием кальция.
a — без Ca, *б* — 0,15% Ca, *в* — 0,024% Ca

Основной особенностью прямых полюсных фигур (ППФ) листов, закаленных после выдержки при температуре 530 °С после нагрева в селитровой ванне, является наличие сильного центрального максимума ($P \sim 10-20$), соответствующий кубической текстуре, которая формируется обычно в процессе рекристаллизации. Помимо кубической текстуры, на ППФ подповерхностных слоев сплавов 1 (без кальция) и 3 (содержание кальция 0,025 %) фиксировались следы текстуры Госса типа $\{110\}-\langle 001 \rangle$ и компонент $\{113\}-\langle 332 \rangle$, которая ослабляет способность материала к глубокой вытяжке.

На большинстве полюсных фигур отмечены изолированные, свидетельствующие о присутствии крупных зерен, интенсивные максимумы, выстраивающиеся в кольца, отвечающие углу наклона $\chi \approx 55^\circ$, что указывает на возможность формирования аксиальной текстуры $\{111\} \langle hkl \rangle$. Полюсные фигуры сплава 2 (содержание кальция 0,15%) имеют более регулярный характер, на них практически полностью отсутствуют сильные изолированные максимумы, что позволяет говорить о модифицирующем воздействии добавки кальция.

В процессе исследования образцов установлено систематическое изменение интенсивности кубического компонента при варьировании химического состава (содержания кальция), указывающее на возможность регулирования текстуры, и, соответственно, штампуемости изучаемых листов за счет введения в качестве легирующих добавок кальция.

В образцах сплавов 1 (без кальция) и 3 (содержание кальция 0,025%) по толщине листа имеет место неоднородность зёрненной структуры — в поверхностном слое прошла собирательная рекристаллизация, во внутренних слоях рекристаллизация идет с образованием сильной кубической текстуры и зерен с ориентацией (113)–(114).

В листах сплава 2 (содержание кальция 0,15%) резкой неоднородности текстуры по толщине не наблюдается, наблюдается выравнивание кубической текстуры по толщине. В поверхностном слое сильные индивидуальные максимумы отсутствуют, в промежуточном слое наблюдаются следы текстуры Госса. Во внутреннем слое имеет место цепочка текстурных максимумов, отвечающая регулярности в ориентировке зерен, сформировавшихся при рекристаллизации на её определенном этапе. Очень однородной

равномерной зёрненной структурой по толщине обладают листы сплава 2, что должно обеспечить высокую технологичность листов с содержанием легирующей добавки кальция 0,15% при глубокой вытяжке.

Рентгенофазовым анализом удалось идентифицировать отдельные наиболее интенсивные рефлексы интерметаллических фаз, присутствующих в листах (Рисунок 2). Как и обычно, для сплавов системы Al–Mg–Si типа авиаль, в основном, это фазы, содержащие железо, такие как α -(Al, Fe, Si), Al_3Fe , $Al_{18}Cu_4Si$ и пр. По интенсивности дополнительных рефлексов примесных фаз сплавы 1 (без кальция), 2 (содержание кальция 0,15%) и 3 (содержание кальция 0,025%) различаются несущественно. Оценка общего содержания избыточных фаз в сплаве 2 после закалки дает величину ~ 5 об. %.

Оценивая влияние легирующей добавки кальция как модифицирующего компонента, сдерживающего развитие собирательной рекристаллизации, следует, прежде всего, отметить, что он может, как и другие щелочноземельные металлы II группы, проявить себя в качестве поверхностно-активного элемента. Не исключено также, что легирующие добавки кальция, как фазообразующего компонента, приводят к образованию дисперсных частиц избыточных интерметаллидных фаз или неорганических соединений, способствующих зарождению новых зерен.

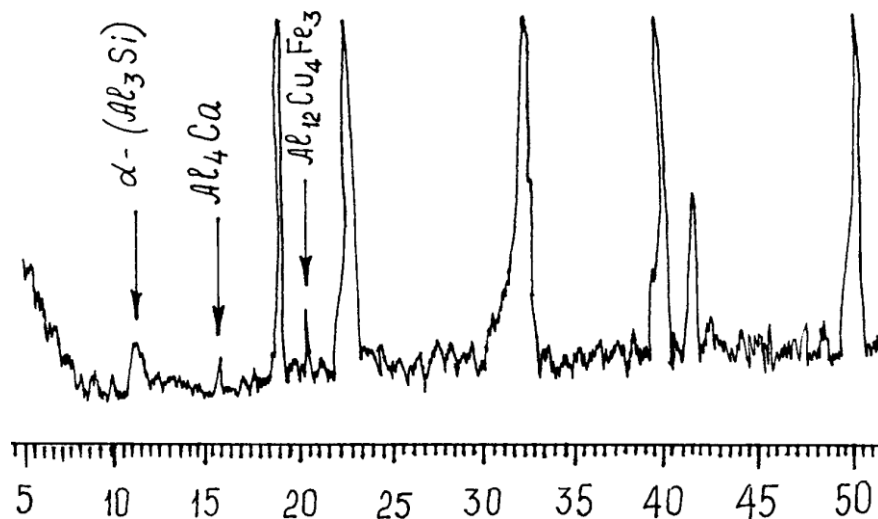


Рисунок 2. Дифрактограмма сплава с содержанием кальция 0,15%

Проведено исследование изотропности листов в состоянии Т в направлениях вдоль (Д), поперек (П) и под углом 45° к оси прокатки (Таблица 2). Для состояния Т приведен разбег свойств: в числителе минимальные и максимальные значения, в знаменателе — средние.

Полученные результаты механических свойств при растяжении листов из сплавов трех составов в состоянии Т показывают, что кальций практически не влияет на уровень механических свойств листов вне зависимости от направления вырезки образцов относительно оси прокатки.

Однако на сплаве 2 с максимальным содержанием кальция 0,15% в состоянии полной термической обработки Т1 наблюдается некоторое повышение прочностных характеристик при сохранении высокой пластичности в сравнении с аналогичными характеристиками для сплавов 1 и 3.

Изотропность листового материала в состоянии Т свидетельствует о том, что при проведении холодной деформации, течение металла во всех направлениях будет проходить равномерно. Вероятность образования поверхностных дефектов в одном из направлений или разрушения будет минимальной.

Таблица 2.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КАЛЬЦИЯ

Сплав	Состояние	Направление	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	Т	Д	$\frac{230-235}{232}$	$\frac{69-88}{78}$	$\frac{26,0-27,0}{26,5}$
		П	$\frac{215-225}{220}$	$\frac{71-76}{74}$	$\frac{24,5-27,0}{26,0}$
		45°	$\frac{235-235}{235}$	$\frac{89-95}{92}$	$\frac{26,0-27,0}{26,5}$
2	Т	Д	$\frac{225-230}{227}$	$\frac{88-100}{94}$	$\frac{22,0-24,5}{23,5}$
		П	$\frac{230-230}{230}$	$\frac{98-105}{100}$	$\frac{22,0-24,5}{23,5}$
		45°	$\frac{220-235}{230}$	$\frac{76-85}{81}$	$\frac{23,0-24,0}{23,5}$
3	Т	Д	$\frac{225-235}{230}$	$\frac{95-97}{96}$	$\frac{24,0-27,0}{25,0}$
		П	$\frac{225-240}{230}$	$\frac{88-95}{92}$	$\frac{26,0-27,0}{26,5}$
		45°	$\frac{235-240}{237}$	$\frac{95-98}{96}$	$\frac{27,0-28,0}{27,5}$

Результаты испытаний технологических свойств листов из сплавов системы Al–Mg–Si с различным содержанием кальция приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЛИСТОВ
 С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КАЛЬЦИЯ

Сплав	Показатель технологичности			
	R_{min}	$K_{выд}$	H , мм	Дефекты поверхности
1	$(0,6-0,8) \cdot S$	35–38	20	Да («апельсиновая корка»)
2	$(0,6-0,8) \cdot S$	41–43	23	Нет
3	$(0,6-0,8) \cdot S$	40–42	22	Да («апельсиновая корка»)

S — толщина листа, мм

Испытания образцов на минимальный уголгиба показали, что сплавы всех трех составов обладают повышенной технологической пластичностью при гибке, R_{min} составляет $(0,6-0,8) \cdot S$, где S — толщина листа. Наилучшей технологической пластичностью при выдавке обладают листы из сплавов с легирующими добавками кальция: максимальный $K_{выд}$ и гладкая поверхность испытанных образцов получены на сплаве 2 с содержанием кальция 0,15 %, несколько ниже — у сплава 3 с содержанием кальция 0,025%, минимальный — у сплава 1 без кальция.

В двух последних случаях на поверхности образцов наблюдается дефект типа «апельсиновая корка», что можно объяснить крупным, в сравнении со сплавом 2, зерном и собирательной рекристаллизацией, которая протекает в поверхностных слоях листов сплавов состава 1 и 3.

На технологичность листов при изготовлении из них деталей методами холодной деформации, в том числе с глубокими степенями вытяжки, большое влияние оказывает анизотропия материала.

Для оценки изотропности листов толщиной 1,5 мм были проведены испытания механических свойств на образцах, ориентированных под различными углами к направлению оси прокатки. Заготовки испытывали в состоянии Т (закалка и естественное старение) и Т1 (закалка и искусственное старение) из сплава 2 (Таблицы 4 и 5).

Таблица 4.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВ СПЛАВА 2 В ЗАВИСИМОСТИ
 ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ВЫРЕЗКИ ОБРАЗЦА В ЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ

Направление вырезки образца	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Д	250–255	185–190	28,0–28,5
15°	255–260	185–190	29,0–30,5
30°	255–260	180–185	31,0–31,5
45°	250–260	180–195	28,5–30,5
60°	253–255	175–185	28,5–31,0
75°	250–255	170–180	28,0–30,0
П	255–260	175–180	27,5–28,5

Таблица 5.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВ СПЛАВА 2 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ
 ВЫРЕЗКИ ОБРАЗЦА В ЗАКАЛЕННОМ И ИСКУССТВЕННО СОСТАРЕННОМ СОСТОЯНИИ

Направление вырезки образца	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Д	330–335	305–310	13,5–17,5
15°	330–340	300–305	13,0–15,0
30°	335–340	300–310	12,0–15,0
45°	330–335	305–315	14,0–16,0
60°	335–340	300–310	13,0–15,0
75°	335–340	305–310	14,0–15,0
П	330–340	300–305	13,5–17,0

Установлено, что в листах как в состоянии Т, так и в Т1, отсутствует анизотропия механических свойств, что говорит об изотропности материала, деформация во время холодной листовой штамповки будет распределяться во всех направлениях равномерно.

В результате проведенных исследований установлено:

– наименьшая анизотропия и наиболее стабильные свойства в долевом и поперечном направлениях наблюдаются у листов толщиной 1,0, 1,5 и 3,0 мм, закаленных с температуры (525 ± 5) °С после выдержки 20 мин;

– листы в свежезакаленном состоянии обладают наилучшей технологичностью при гибке $(0,8-1,2) \cdot S$, где S – толщина листа. После естественного старения в течение 1 месяца у листов сохраняется удовлетворительная технологическая пластичность при гибке $(1,3-1,6) \cdot S$.

– на листах толщиной 1,5 мм из сплава АВ с 0,15% кальция как в состоянии Т, так и в Т1, отсутствует анизотропия механических свойств, что говорит об изотропности материала.

Список литературы:

1. Бецофен С. Я., Мацнев В. Н., Костыкова О. С., Масюков С. А. Текстура и анизотропия механических свойств титановых и алюминиевых сплавов // Авиационная промышленность. 2004. №4. С. 31–35.
2. Швечков Е. И. Анизотропия механических свойств и характеристик трещиностойкости листов из алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2015. №3. С. 72–84.
3. Буркин С. П., Бабайлов Н. А., Овсянников Б. В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: справ, пособие. Екатеринбург, 2010. 344 с.
4. Арышенский Е. В., Беглов Э. Д., Гречникова А. Ф., Панкратов М. В. Формирование текстуры деформации при горячей прокатке алюминиевых листов в многоклетевых непрерывных станах // Технология легких сплавов. 2015. №4. С. 45–52.
5. Пазылов Ш. Т., Оморов Н. А., Рудаев Я. И. О деформационной анизотропии

алюминиевых сплавов // Вестник ТГУ. 2010. Т. 15. №3. С. 974–975.

6. Алюминий: свойства и физическое металловедение: справ, изд. / пер. с англ. под ред. Хэтча Дж. Е. М.: Металлургия, 1989. 422 с.

7. Арышенский Е. В., Беглов Э. Д., Арышенский В. Ю., Панкратов М. А. Исследование влияния внешнего трения при горячей прокатке на текстуру ленты из алюминиевого сплава 3104 // Производство проката. 2012. №7. С. 14–17.

8. Логинов Ю. Н., Дегтярева О. Ф. Влияние скорости деформации на эффект структурного упрочнения прессованных труб из алюминиевого сплава 6061 // Технология легких сплавов. 2007. №4. С. 123–127.

9. Логинов Ю. Н., Головнин М. А., Лобанов М. Л., Дорошенко Н. М. Исследование влияния технологии производства плоского проката из сплава системы Al–Mg–Si на анизотропию свойств // Технология легких сплавов. 2016. №3. С. 69–74.

References:

1. Becofen S. Ja., Macnev V. N., Kostyкова O. S., Masjukov S. A. Tekstura i anizotropija mehanicheskikh svojstv titanovykh i aljuminievykh spлавov. Aviacionnaja promyshlennost, 2004, no. 4, pp. 31–35.

2. Shvechkov E. I. Anizotropija mehanicheskikh svojstv i harakteristik treshhinostojkosti listov iz aljuminievykh spлавov. Tehnologija legkih spлавov, 2015, no. 3, pp. 72–84.

3. Burkin S. P., Babajlov N. A., Ovsjannikov B. V. Soprotivlenie deformacii spлавov Al i Mg: справ, posobie. Ekaterinburg, 2010, 344 p.

4. Aryshenskij E. V., Beglov Je. D., Grechnikova A. F., Pankratov M. V. Formirovanie tekstury deformacii pri gorjachej prokatke aljuminievykh listov v mnogokletevykh nepreryvnykh stanah. Tehnologija legkih spлавov, 2015, no. 4, pp. 45–52.

5. Pazylov Sh. T., Omorov N. A., Rudaev Ja. I. O deformacionnoj anizotropii aljuminievykh spлавov. Vestnik TGU, 2010, v. 15, no. 3, pp. 974–975.

6. Aljuminij: svojstva i fizicheskoe metallovedenie: справ, izd. Per. s angl. pod red. Hjetcha Dzh. E. Moscow, Metallurgija, 1989, 422 p.

7. Aryshenskij E. V., Beglov Je. D., Aryshenskij V. Ju., Pankratov M. A. Issledovanie vlijanija vneshnego trenija pri gorjachej prokatke na teksturu lenty iz aljuminieвого сплава 3104. Proizvodstvo prokata, 2012, no. 7, pp. 14–17.

8. Loginov Ju. N., Degtjareva O. F. Vlijanie skorosti deformacii na jeffekt strukturnogo uprochnenija pressovannykh trub iz aljuminieвого сплава 6061. Tehnologija legkih spлавov, 2007, no. 4, pp. 123–127.

9. Loginov Ju. N., Golovnin M. A., Lobanov M. L., Doroshenko N. M. Issledovanie vlijanija tehnologii proizvodstva ploskogo prokata iz сплава системы Al–Mg–Si na anizotropiju svojstv. Tehnologija legkikh spлавov, 2016, no. 3, pp. 69–74.

*Работа поступила
в редакцию 24.12.2016 г.*

*Принята к публикации
29.12.2016 г.*

Ссылка для цитирования:

Гуреева М. А., Грушко О. Е., Овчинников В. В. Влияние кальция на анизотропию механических свойств листов алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №2 (15). С. 369–376. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/gureeva> (дата обращения 15.02.2017).

Cite as (APA):

Gureeva, M., Grushko, O., & Ovchinnikov, V. (2017). Effect of calcium on the anisotropy of the mechanical properties of aluminium alloy sheet system Al-Mg-Si. *Bulletin of Science and Practice*, (2), 369–376. Available at: <http://www.bulletennauki.com/gureeva>, accessed 15.02.2017. (In Russian).