



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки).
УДК 669-1

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.027



ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД0, АМЦ и Д16

Екатерина Александровна Носова ¹, Василий Андреевич Разживин ²,
Антонина Александровна Кузина ³, Александр Викторович Трибунский ⁴

^{1, 2, 3, 4} Самарский университет, Самара, Россия

¹ eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

² vasia.razzhivin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9735-5307>

³ kuzinaantonina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5109-4428>.

⁴ tribunsky.alexander@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6881-1561>

Аннотация. Уменьшение толщины листовых алюминиевых сплавов позволяет получать облегченные конструкции и слоистые композиты. Однако при уменьшении толщины образцов менее 0,5 мм существенно изменяются механические и технологические свойства сплавов. Одной из причин такого поведения является кристаллографическая текстура. Для изучения её особенностей методом холодной прокатки получены тонкие ленты из сплавов АД0, АМц и Д16 толщиной 0,4 и 0,2 мм, проведён отжиг. Представлены прямые и обратные полюсные фигуры, зависимости полюсной плотности от толщины образцов и марки сплава. Установлено, что в сплаве Д16 после холодной прокатки и отжига в образцах толщиной 0,4 и 0,2 мм текстурные компоненты сохраняются, изменяется их полюсная плотность. В техническом алюминии АД0 отдельные текстурные компоненты, такие как {110}<1-12>, {4-16}<-121>, {-3-5-1}<1-12>, {110}<001> сохраняются, компоненты {213}<11-1> и {311}<-112> присутствуют только в образцах толщиной 0,4 мм, а компоненты {1-31} <323> и {-101}<353> присутствуют только в образцах толщиной 0,2 мм. В сплаве АМц велика бестекстурная составляющая, которая представляет собой набор различных компонент, которые не встречаются в большинстве алюминиевых сплавов, в том числе в тех, которые представлены в этом исследовании. Механические свойства тонких лент из исследуемых сплавов связаны с кристаллографической текстурой. Постоянство текстурных компонент в образцах из сплава Д16 приводит к снижению механических свойств с уменьшением толщины от 0,4 до 0,2 мм. Бестекстурное состояние, которое наблюдается в сплаве АМц, вызывает снижение прочностных показателей и повышение пластичности, а смешанное состояние кристаллографической текстуры в техническом алюминии АД0 вызывает увеличение прочностных показателей и снижение относительного удлинения.

Ключевые слова: тонкие ленты, алюминиевые сплавы, кристаллографическая текстура, прямые полюсные фигуры, обратные полюсные фигуры, полюсная плотность, механические свойства.

Для цитирования: Носова Е. А., Разживин В. А., Кузина А. А., Трибунский А. В. Исследование кристаллографической текстуры тонких лент из алюминиевых сплавов АД0, АМц и Д16 // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 181 – 190. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.027, EDN: <https://elibrary.ru/IDMZJJ>.

Original article

INVESTIGATION OF THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF THIN TAPES MADE OF ALUMINUM ALLOYS AD0, AMC AND D16

Ekaterina A. Nosova ¹, Vasilii A. Razzhivin ², Antonina A. Kuzina ³,
Aleksander V. Tribunskiy ⁴

^{1, 2, 3, 4} Samara University, Samara, Russia

¹ eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

² vasia.razzhivin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9735-5307>

© Носова Е. А., Разживин В. А., Кузина А. А., Трибунский А. В., 2024

³ kuzinaantonina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5109-4428>.

⁴ tribunsky.alexander@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6881-1561>

Abstract. *The reduction in the thickness of aluminium sheet alloys allows the production of lightweight structures and laminated composites. However, the mechanical and technological properties of alloys change significantly when the thickness of samples is reduced to less than 0.5 mm. One reason for this behavior is the crystallographic texture. To study its features, thin tapes of 0.4 and 0.2 mm thick AD0, AMc and D16 alloys were produced by cold rolling and annealed. There are complete and inverse pole figures, dependence of pole density on thickness of samples and grade of alloy. It has been established that in the alloy D16 after cold rolling and annealing in 0.4 and 0.2 mm thick samples texture components are retained, their pole density is changed. In technical aluminium AD0, some texture components such as $\{110\}\langle 1-12\rangle$, $\{4-16\}\langle -121\rangle$, $\{3-5-1\}\langle 1-12\rangle$, $\{110\}\langle 001\rangle$ are retained, components $\{213\}\langle 11-1\rangle$ and $\{311\}\langle 112\rangle$ are present only in samples thickness 0,4, and components $\{31-1\}\langle 353\rangle$ are only present in 0.2 mm thick samples. The Al-1%Mn alloy has a large textless component, which is a set of different components that are not found in most aluminum alloys, including those presented in this study. The mechanical properties of thin tapes made of studied alloys are related to the crystallographic texture. The consistency of texture components in D16 alloy samples results in a reduction in mechanical properties with a reduction in thickness from 0.4 to 0.2 mm. The textless condition observed in the Al-1%Mn alloy causes a decrease in strength and an increase in plasticity, a mixed state of crystallographic texture in technical aluminium AD0 causes increased strength and reduced elongation.*

Keywords: *thin bands, aluminum alloys, crystallographic texture, straight complete, reverse inverse, pole density, mechanical properties.*

For citation: Nosova E.A., Razzhivin V.A., Kuzina A.A. & Tribunskiy A.V. (2024). Investigation of the crystallographic texture of thin tapes made of aluminum alloys AD0, AMC AND D16. *Polzunovskiy vestnik*. (3), 181-190. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.03.027. EDN: <https://elibrary.ru/IDMZJJ>.

ВВЕДЕНИЕ

Облегчение конструкций из алюминиевых сплавов приводит к необходимости уменьшения их толщины [1, 2]. Это позволяет получать мембранные изделия, экономить листовые материалы, а также снижает финансовую нагрузку при их транспортировке. Однако при уменьшении толщины наблюдается снижение механических свойств и характеристик штампуемости [3], которые необходимы для реализации технологических процессов.

Также уменьшение толщины актуально и для слоистых композитов или многослойных материалов. Получение из них гнутых или цельнотянутых изделий требует обеспечения необходимой штампуемости. Выявлено, что при прокатке и отжиге листовых алюминиевых сплавов до толщины 0,4 мм значительного изменения свойств и структуры по сравнению с образцами толщиной 1 мм не наблюдается. Но при меньшей толщине снижение механических свойств становится ярко выраженным [4,5].

Причинами снижения механических и технологических характеристик в сплаве определённой марки могут быть размер зерна, фазовый состав, накопление дефектов кристаллического строения после больших обжатий и применения отжигов с относительно невысокими температурами или сравнительно короткими выдержками [6, 7, 8]. Но наиболее значимой для штампуемости является кристаллографическая текстура [8,9]. Применительно к алюминиевым сплавам, в ряде работ выявлено влияние определённых ориентировок и их полюсной плотно-

сти на показатели анизотропии прочностных и пластических свойств (коэффициенты поперечной деформации и коэффициенты Лэнкфорда), показатели предельных деформаций, предельный коэффициент вытяжки [10,11]. Например, кристаллографические ориентировки $\{123\}\langle 634\rangle$ и $\{100\}\langle 001\rangle$ снижают анизотропию пластических характеристик, а ориентировки $\{112\}\langle 111\rangle$ и $\{100\}\langle 011\rangle$, наоборот, её усиливают [12].

Формирование кристаллографической текстуры происходит на всех этапах производства листовых полуфабрикатов, начиная от литья слитков, и заканчивая пластическим деформированием и термической обработкой [13, 14, 15].

На практике кристаллографическую текстуру изучают с помощью полюсных фигур, которые отражают распределение полюсной плотности определённой кристаллографической плоскости [9, 10, 12]. Но на показатели механических и технологических свойств может оказывать влияние не только положение определённой плоскости, но и полюсная плотность, т.е. объём структуры или количество зёрен, имеющих схожую кристаллографическую ориентировку [13,14].

Целью исследования было изучить видоизменение кристаллографической текстуры в сплавах АД0, АМц и Д16 в результате холодной прокатки и отжига лент толщиной 0,4 мм до толщины 0,2 мм, а также влияние этого видоизменения на механические свойства указанных сплавов.

МЕТОДЫ

Для исследования применялись листовые образцы из сплавов Д16, АМц и технического алюминия АД0 толщиной 2 мм.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2024

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД0, АМЦ и Д16

Образцы подвергались холодной прокатке до толщины 0,4 и 0,2 мм.

Для восстановления пластичности образцы подвергались отжигу по режимам, представленным в таблице 1 [4, 6, 8].

Таблица 1 – Режимы термической обработки образцов

Table 1 – Modes of heat treatment of samples

Сплав	Температура, °С	Время выдержки, минуты
Д16	480±3	60
АМц	380±3	60
АД0	320±3	60

Охлаждение проводилось на воздухе до полного остывания.

Кристаллографическую текстуру изучали с

помощью прямых и обратных полюсных фигур.

Для получения данных о текстуре и построения прямых полюсных фигур использовался рентгенографический дифрактометр ДРОН-7М (Буревестник, Санкт-Петербург, Россия), оснащенный приставкой гониометрической для исследования текстур и макронапряжений (ПГТМ), применяли медное $\text{Cu-}\alpha$ -излучение. Для анализа прямых и построения обратных полюсных фигур, оценки компонент текстуры и плотности плоскости применяли программный комплекс LaboTex (LaboSoft, Краков, Польша).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Прямые и обратные полюсные фигуры для образцов исследуемых сплавов для толщины 0,4 и 0,2 мм представлены на рисунках 1-6.

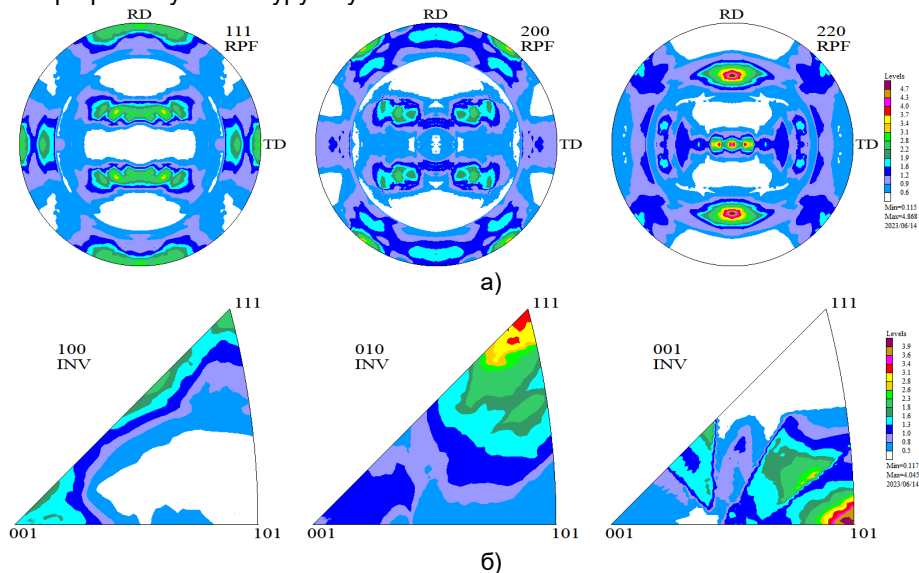


Рисунок 1 – Прямые (а) и обратные (б) полюсные фигуры образцов из сплава АД0 толщиной 0,4 мм
Figure 1 – Complete (a) and inverse (б) pole figures for the samples of aluminum grade AD0 of thickness 0.4 mm

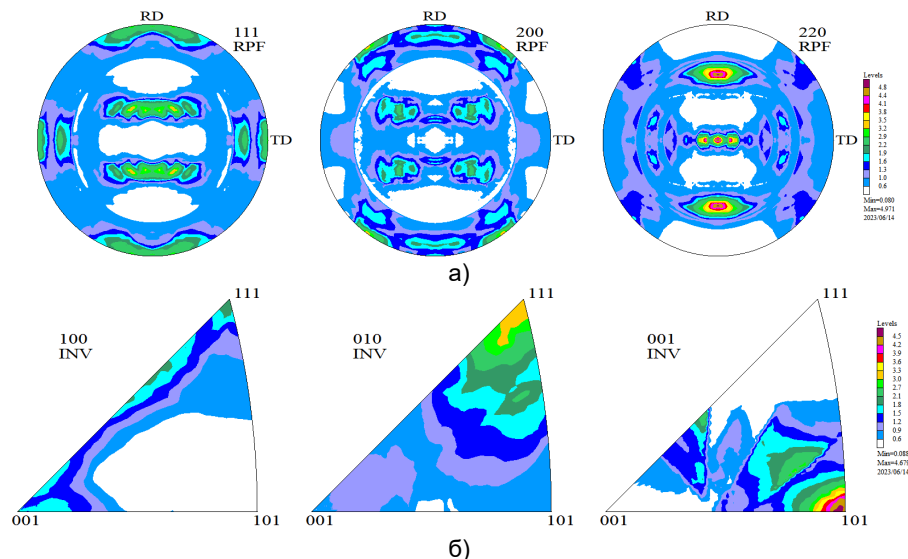


Рисунок 2. Прямые (а) и обратные (б) полюсные фигуры образцов из сплава АД0 толщиной 0,2 мм
Figure 2. Complete (a) and inverse (б) pole figures for the samples of aluminum grade AD0 of thickness 0.2 mm

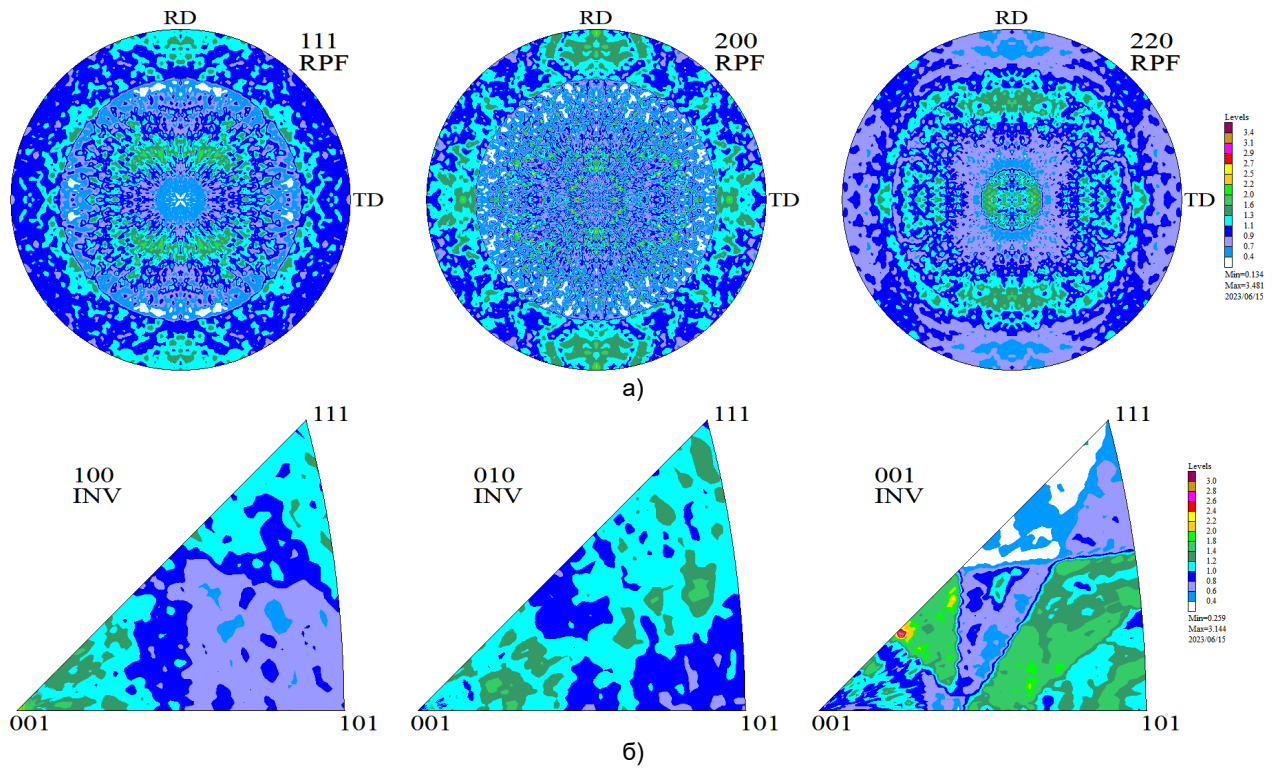


Рисунок 3. Прямые (а) и обратные (б) полюсные фигуры образцов из сплава АМц толщиной 0,4 мм
 Figure 3. Complete (a) and inverse (б) pole figures for the samples of aluminum alloy Al-1%Mn of thickness 0.4 mm

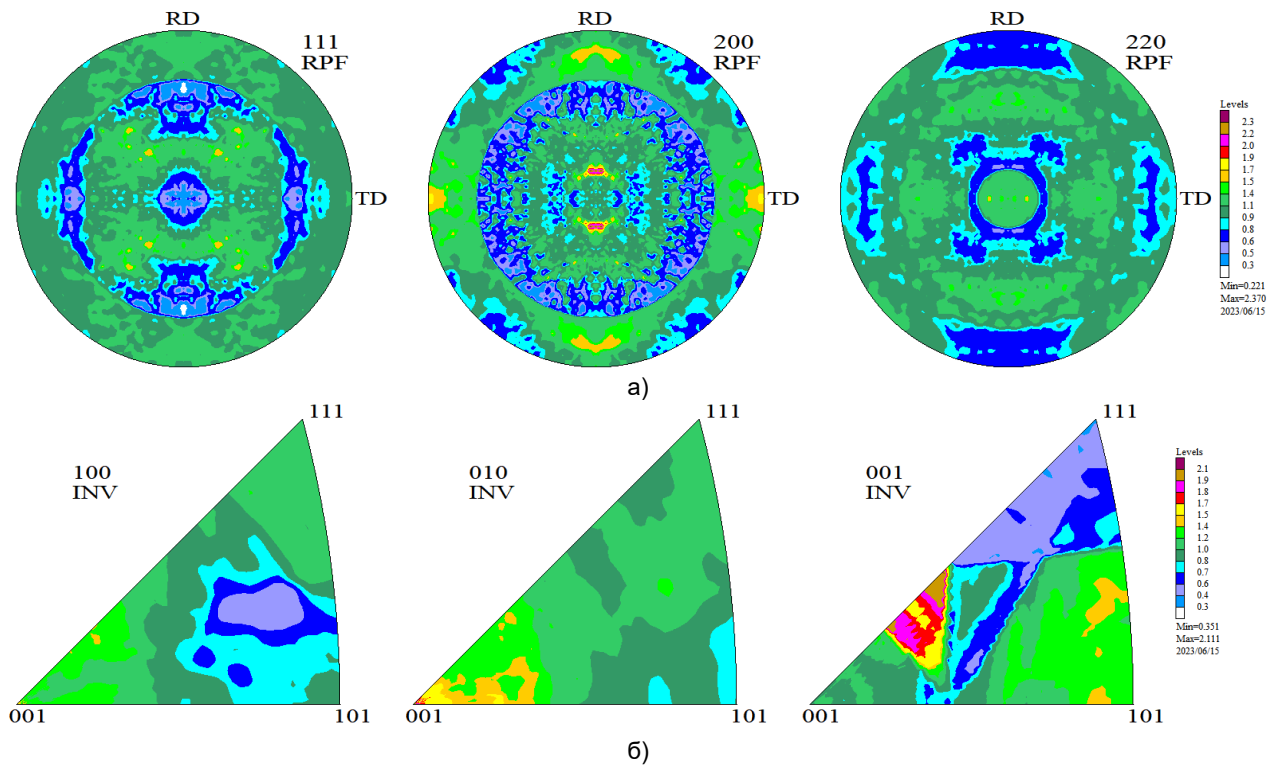


Рисунок 4. Прямые (а) и обратные (б) полюсные фигуры образцов из сплава АМц толщиной 0,2 мм
 Figure 4. Complete (a) and inverse (б) pole figures for the samples of aluminum alloy Al-1%Mn of thickness 0.2 mm

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ
 ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД0, АМЦ и Д16

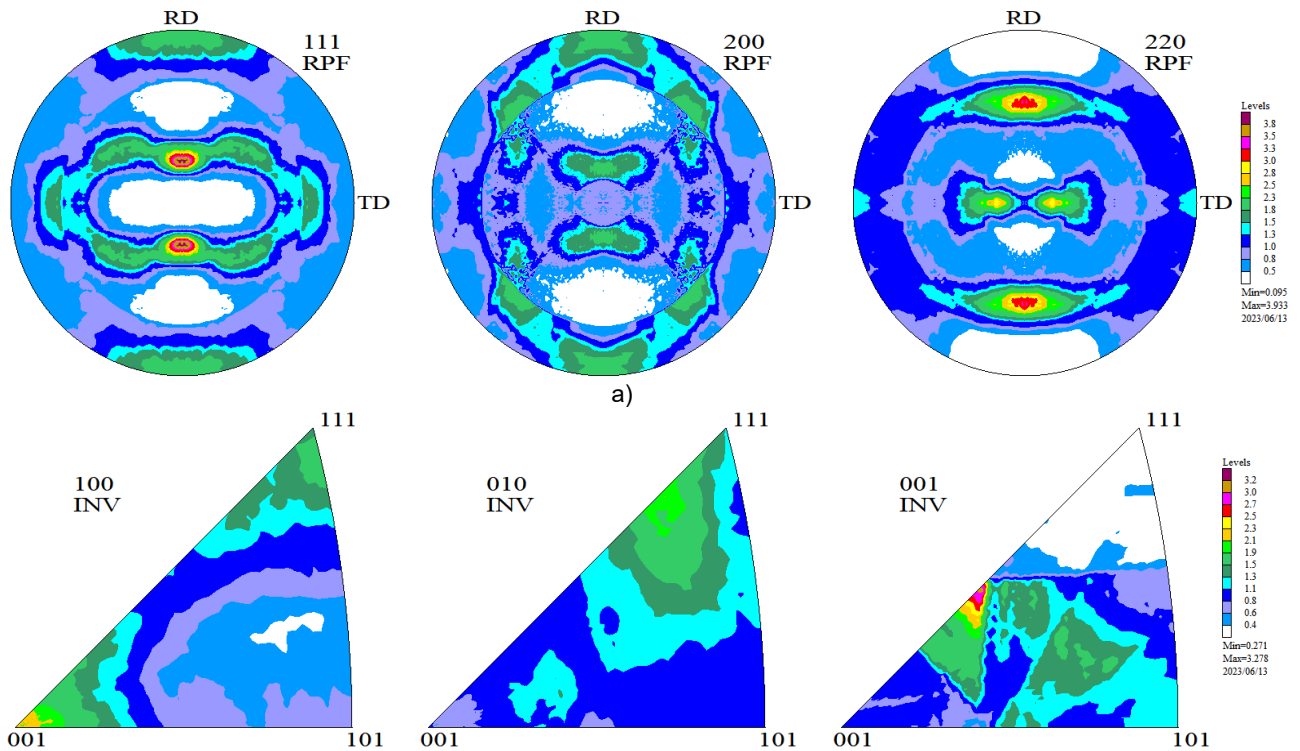


Рисунок 5. Прямые (а) и обратные (б) полюсные фигуры образцов из сплава Д16 толщиной 0,4 мм
 Figure 5. Complete (a) and inverse (б) pole figures for the samples of aluminum alloy AA2024 of thickness 0.4 mm

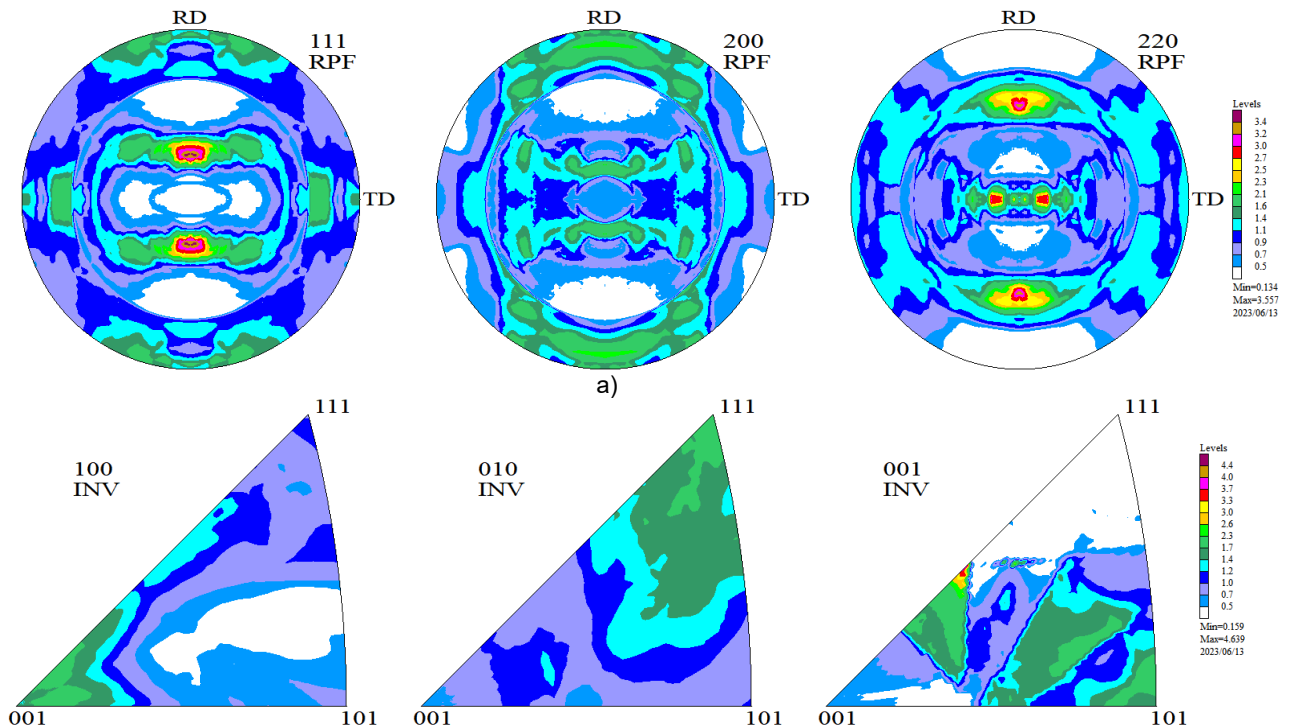


Рисунок 6. Прямые (а) и обратные (б) полюсные фигуры образцов из сплава Д16 толщиной 0,2 мм
 Figure Complete (a) and inverse (б) pole figures for the samples of aluminum alloy AA2024 of thickness 0.2 mm

Анализ прямых и обратных полюсных фигур показывает, что в образцах из сплавов АД0
 POLZUNOVSKIY VESTNIK № 3 2024

и Д16 наблюдается характерная текстура прокатки, а в сплаве АМц наблюдается симметрия

кристаллографической текстуры, характерная для прокатки, однако полюсная плотность и типичные компоненты текстуры принципиально изменяются после прокатки образцов толщиной 0,4 мм до толщины 0,2 мм. Представленная типичная интерпретация кристаллографической текстуры не позволяет сделать более детальный анализ компонент текстуры и её полюсной плотности для сплавов между собой. Для этого в таблицах 2-4 представлена полюсная плотность (объёмная доля зёрен) с характерной текстурной компонентой.

Таблица 2 – Набор текстурных компонент в образцах из технического алюминия АД0

Table 2 – A set of textural components in samples made of technical aluminum AD0

№ компонент	Компоненты текстуры	Объёмная доля, %, в образцах толщиной	
		0,4 мм	0,2 мм
1	{110}<1-12>	33	23
2	{4-16}<-121>	20	13
3	{-3-5-1}<1-12>	16	10
4	{213}<11-1>	13	
5	{311}<-112>	11	
6	{110}<001>	5	4
7	{1-31}<323>		23
8	{-101}<353>		23
	Итого	98	96
	Фон	2	4

Таблица 3 – Набор текстурных компонент в образцах из сплава АМц

Table 3 – Set of textural components in AMc alloy samples

№ компонент	Компоненты текстуры	Объёмная доля, %, в образцах толщиной	
		0,4 мм	0,2 мм
1	{0-15}<100>	28	
2	{210}<-121>	21	
3	{210}<-122>	16	
4	{213}<11-1>	12	
5	{311}<10-3>	11	15
6	{110}<-111>	8	
7	{311}<-112>		24
8	{-3-1-1}<2-5-1>		20
9	{110}<1-12>		13
10	{-101}<353>		12
11	{110}<1-11>		8
	Итого	96	92
	Фон	4	8

Анализ компонент текстур и их полюсной плотности (таблицы 1-3) показывает, что текстурные компоненты в сплавах в зависимости

от толщины изменяются. Например, для технического алюминия при толщине образцов 0,4 и 0,2 мм одинаковыми являются текстурные компоненты {110}<1-12>, {4-16}<-121>, {-3-5-1}<1-12>, {110}<001>, при уменьшении толщины изменятся только их полюсная плотность, но компоненты присутствуют только для образцов толщиной 0,4 мм, а компоненты {1-31}<323> и {-101}<353> - только в образцах толщиной 0,2 мм. Для образцов из сплава Д16 общими компонентами для обеих толщин являются все наблюдаемые компоненты, но с техническим алюминием АД0 общими являются компоненты {110}<1-12>, {110}<001>, {-3-5-1}<1-12>, {311}<-112>, а вместо компоненты {4-16}<-121>, присутствующей в АД0 в обеих толщинах и имеющая значительные показатели полюсной плотности (P0,4=20 и P0,2=13) наблюдается текстурная компонента {1-31}<323> с полюсной плотностью P0,4=31% и P0,2=26%. В образцах из сплава АМц при уменьшении толщины образцов от 0,4 мм до 0,2 мм сохраняется текстурная компонента {311}<10-3> и даже увеличивается её полюсная плотность от 11 до 15%. Остальные компоненты не совпадают ни у двух толщин одного сплава, ни дублируются с образцами сплавов АД0 и Д16, за исключением компоненты {110}<1-12> («текстура латуни»), общей у АМц толщиной 0,2 мм и образцами АД0 и Д16 обеих толщин с остальными и {213}<11-1>, общей у образца из сплава АМц толщиной 0,4 мм и АД0 толщиной 0,4 мм.

Таблица 4 – Набор текстурных компонент в образцах из сплава Д16

Table 4 – A set of textural components in D16 alloy samples

№ компонент	Компоненты текстуры	Объёмная доля, %, в образцах толщиной	
		0,4 мм	0,2 мм
1	{1-31}<323>	31	26
2	{-3-5-1}<1-12>	22	19
3	{311}<-112>	20	19
4	{421}<-112>	17	14
5	{110}<001>	3	10
6	{110}<1-12>	3	9
	Итого	96	97
	Фон	4	3

Графическое представление указанных выше наблюдений представлено на рисунке 7, на котором одинаковые компоненты текстур обозначены одним цветом: например текстура Госса {110}<001> имеет темно зелёный цвет, а текстура латуни {110}<1-12> - светло серый. Такая интерпретация позволяет наглядно отразить изменения кристаллографической текстуры в перечисленных сплавах в зависимости от толщины тонких лент. Заметим при этом, что направление горизонтальной оси и порядок аргумента направлен в порядке убывания толщины

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД0, АМЦ и Д16

ны, что объясняется её уменьшением при проведении прокатки.

Изменение основных механических свойств образцов показано на рис. 8. Графики показывают, что в тонких образцах уровень значений примерно одинаков у всех 3 сплавов, несмотря на различный химический состав и ожидаемый более высокий уровень у сплава Д16.

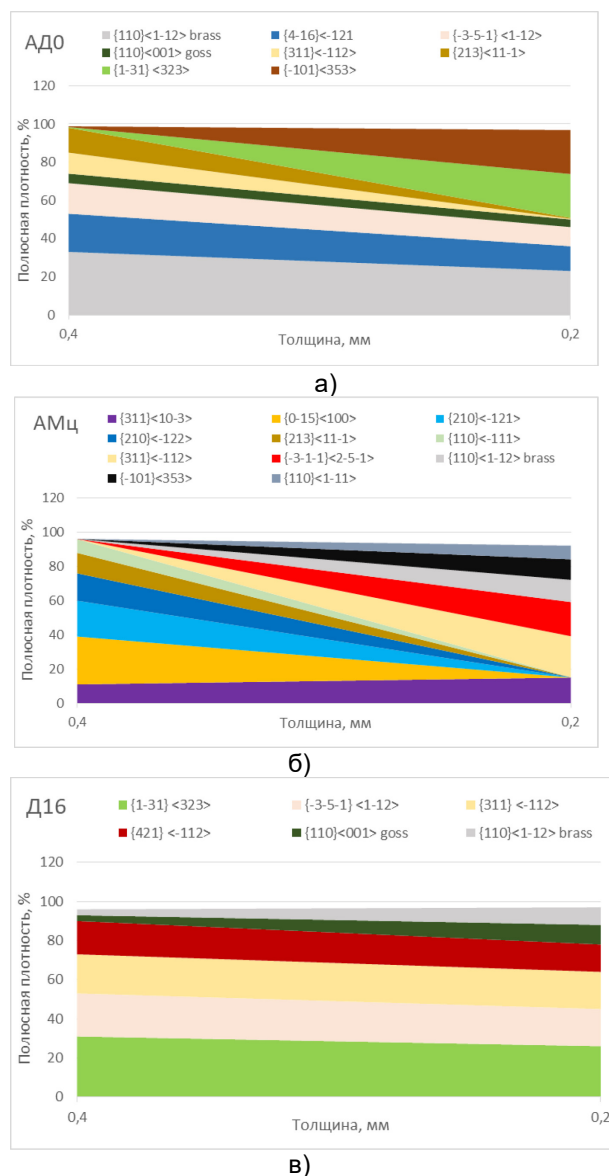


Рисунок 7- Графическое представление полюсной плотности образцов из сплавов АД0 (а), АМц (б), Д16 (в) в зависимости от толщины

Figure 7. Graphical interpretation of the pole density for the samples of aluminum grade AD0 (a), aluminum alloys Al-1%Mn (б) and AA2024 (в) in dependence on thickness

Это указывает на значительное влияние кристаллографической текстуры на механические свойства материалов, особенно при

уменьшении толщины менее 0,5 мм. У образца АМц, имеющего наиболее высокие значения бестекстурной составляющей (рис.3, 4) снижение толщины приводит к снижению показателей прочности и повышению относительного удлинения. У образцов Д16, имеющих постоянство в наборе компонент текстуры при уменьшении толщины от 0,4 до 0,2 мм, снижаются все показатели механических свойств, как прочностных, так и пластических.

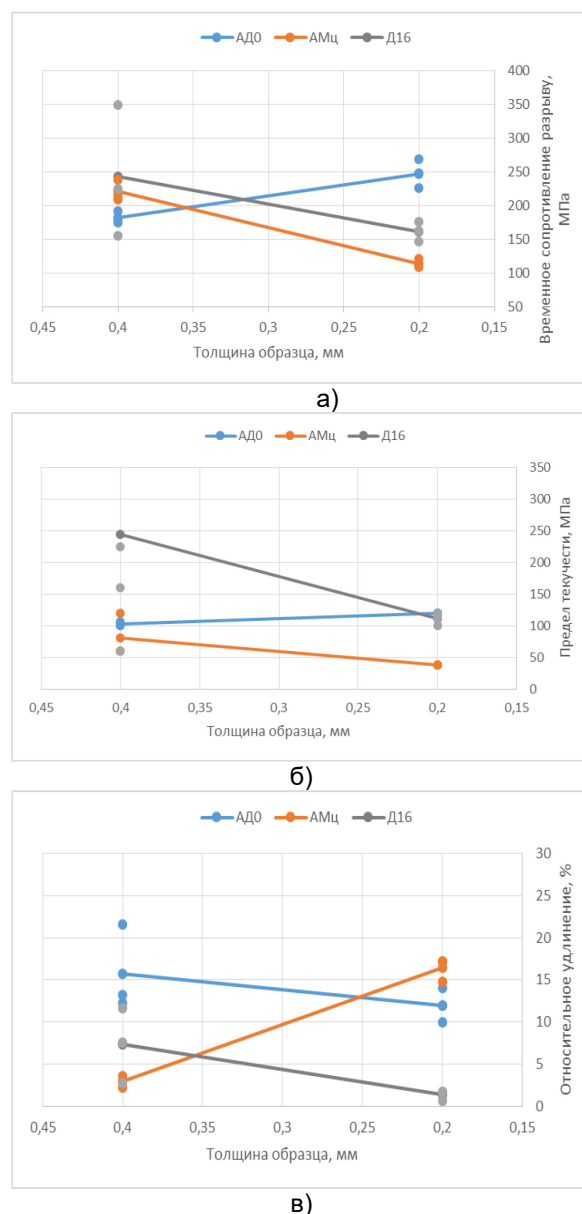


Рисунок 8- Изменение временного сопротивления разрыву (а), предела текучести (б) и относительного удлинения (в) образцов из сплавов АД0, АМц, Д16 в зависимости от толщины

Figure 8. Ultimate strength (a), yield stress (б) and elongation for the samples of aluminum grade AD0 (a), aluminum alloys Al-1%Mn and AA2024 in dependence on thickness

У образца их технического алюминия АД0, имеющего повторение компонент текстуры, а также появление или исчезновение отдельных компонент текстуры при уменьшении толщины, показатели прочности повышаются, при этом наблюдается снижение относительного удлинения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В [9] показано, что в зависимости от степени совершенства текстуры прокатки, состава сплава, режима отжига и некоторых других факторов в алюминиевых сплавах АМг6, ВД1 и 1441 (толщиной 1–3 мм) при оптимальных условиях текстура отжига характеризуется кубической компонентой $\{001\}\langle 100\rangle$, сильной и в высокой степени совершенной. Но возможно и образование текстуры со средней или слабой кубической $\{001\}$ компонентой, с большим рассеянием по плоскости и направлению, а также с присутствием в структуре ориентаций из областей рассеяния текстурных компонент деформации [16]. После отжига текстура листов указанных сплавов существенно изменяется: в центре полюсных фигур $\{200\}$ образцов отожженных образцов появляется повышенная полюсная плотность, которая отсутствует в центре полюсных фигур $\{200\}$ образцов после прокатки. Однако в текстуре отжига могут присутствовать и ориентации из областей рассеяния текстурных компонент деформации, о чем свидетельствует вид полюсной фигуры. Полюсные фигуры $\{111\}$ образцов после промежуточного отжига подтверждают возможность развития двух типов текстур. Рассредоточенный и нечеткий вид областей повышенной интенсивности на полюсных фигурах отожженных образцов, по мнению авторов [9], связан с несовершенством исходной текстуры деформации, а также того, что во время отжига при высоких температурах успевал происходить значительный рост зерна.

В [17] представлен способ обработки сплава 2xxx, который обеспечивает получение рекристаллизованного листового проката с улучшенным сочетанием прочности и вязкости. Полученный прокат имел текстуру латуни и текстуру Госсса, при этом интенсивность текстуры Госсса меньше, чем интенсивность текстуры латуни.

В [18] изучено влияние кристаллографической текстуры и структуры границ зёрен на механические свойства сверхпластичных алюминиевых сплавов Al-2ат%Mg-0.16ат%Zr и Al-2ат%Cu-0.16ат%Zr с одинаковым исходным размером зёрен 8 мкм. В исходном состоянии (электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования) сплавы содержат различную кристаллографическую текстуру. В сплаве Al-Mg-Zr выявлено около 70% границ зёрен, близких к специальным, и кристаллографическая текстура с высокой интенсивностью максимумов в направлении, близком к направлению прокатки (НП), на полюсной фигуре (111).

188

В сплаве Al-Cu-Zr выявлено более 90 % границ зёрен обычного типа с произвольной разориентировкой зёрен. Кристаллографическая текстура сплава с 2 % меди характеризуется низкими значениями интенсивностей максимумов полюсной фигуры (111). Обнаружено, что улучшенные значения показателей сверхпластичности наблюдаются в сплаве Al-Cu-Zr с обычными границами зёрен и менее острой кристаллографической текстурой.

В [10] выявлены признаки значительных различий в эволюции текстуры между чистым Al (AA1070) и его сплавами 4,5%Mg alloy (AA5083) и Al-4,5% Cu-сплав (AA2014). Ультра мелкозернистая структура (размер зерна 1,2-1,5 мкм) в алюминии имеет острую текстуру меди, а в сплавах присутствует смешанная текстура, включающая текстуру латуни, S, меди и текстуру Dillamore-компонентов вместе с текстурой β -волокна (β -fiber).

Образцы с мелкозернистой структурой (3,85...4,0 - 4 мкм) этих сплавов содержат комбинацию элементов деформации и рекристаллизации текстуры (Goss и Cube), а образцы с крупнозернистой структурой (16,4...20 мкм) теряют большинство своих текстурных характеристик. Среди исследованных материалов, у мелкозернистого алюминия AA1070 наблюдалось сочетание самых высоких показателей анизотропии (R) и предельной степени деформации с почти нулевой планарной анизотропией (ΔR). Это позволило успешно реализовать глубокую вытяжку, что авторы связывают с благоприятной текстурой, состоящей из комбинации компонент текстуры меди и размытых компонент куба и особенностями границ зёрен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение прокатки с обжатием 50 % и отжига тонких образцов толщиной 0,2 и 0,4 мм сплавов АД0, АМц и Д16 по общепринятым в производстве режимам приводит к видоизменению кристаллографической текстуры.

В сплаве Д16 после указанной обработки текстурные компоненты сохраняются, изменяется их полюсная плотность. В техническом алюминии отдельные текстурные компоненты, такие как $\{110\}\langle 1-12\rangle$, $\{4-16\}\langle -121\rangle$, $\{3-5-1\}\langle 1-12\rangle$, $\{110\}\langle 001\rangle$ сохраняются, но в то же время компоненты $\{213\}\langle 11-1\rangle$ и $\{311\}\langle -112\rangle$ в результате прокатки и отжига исчезают, но появляются компоненты $\{1-31\}\langle 323\rangle$ и $\{-101\}\langle 353\rangle$. В сплаве АМц велика бестекстурная составляющая, которая представляет собой набор различных компонент, которые не встречаются в большинстве алюминиевых сплавов.

Механические свойства тонких лент из исследуемых сплавов связаны с кристаллографической текстурой. Постоянство текстурных компонент в образцах из сплава Д16 приводит к

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД0, АМЦ и Д16

снижению механических свойств с уменьшением толщины от 0,4 до 0,2 мм. Состояние, которое наблюдается в сплаве АМЦ, вызывает снижение прочностных показателей и повышение пластичности, а промежуточное состояние кристаллографической текстуры в техническом алюминии АД0 вызывает увеличение прочностных показателей и снижение относительного удлинения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avalanche dynamics in crumpled aluminum thin foils / M. Abobaker [и др.]. // Scripta Materialia. 2015. № 99. С 17-20, <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.11.016>.
2. T.A. Kals, R. Eckstein. Miniaturization in sheet metal working // J. Mater. Process. Technol. 2000. 103. С 95–101, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00391-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00391-5).
3. Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of copper/aluminum composite thin strip / Ch. Wang [и др.]. // Trans. Nonfer. Met. Soc. of China. 2023. № 33 (3). С. 701-713, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.188>.
4. Research of sheet thickness effect on mechanical and technological properties of Al-1%Mn aluminium alloy / E.Nosova и др.]. // Int. J. Nanotech. 2018. т. 15. № 4-5. с. 324-332. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2018.094789>.
5. Tribunskiy A.V., Nosova E.A., Aryshenskiy V.Yu. Effect of manganese and magnesium content and conditions of annealing on mechanical properties and cracking formation during bending of aluminum alloy AA3005 // Solid State Phenomena. 2018. т. 284. с. 476-482, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.476>.
6. Diehl A., Engel U., Geiger M., Influence of microstructure on the mechanical properties and the forming behaviour of very thin metal foils // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2010. №47. С 53–61, <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1851>.
7. Влияние высокотемпературного отжига алюминиевых сплавов АМг6 и В95 на их структурно-фазовое состояние и прочностные свойства / Зенин М.Н [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 1. С. 106-114, DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.012.
8. Луконина (Селиверстова) Н.В. Влияние структурной энтропии на штампуемость листов из алюминиевых сплавов АД0 (1011) и Д16 (1160) // Ползуновский вестник. 2019. № 2. С. 151-159.
9. Исследование текстуры алюминиевых сплавов после холодной прокатки, отжига и облучения ионами Ag+ 2010 г. / Овчинников В. В. и др.]. // Физика металлов и металловедение. 2010, том 109, № 1, с. 83–92
10. Dhal A., Panigrahi S.K., Shunmugam M.S. A comprehensive study on size-effect, plastic anisotropy and microformability of aluminum with varied alloy chemistry, crystallographic texture, and microstructure // Materials Science & Engineering A. 2023. № 876. С. 145111.
11. Исследование влияния исходной анизотропии механических свойств листов из алюминиевого сплава 8011А на предельный угол инкрементального формообразования / Петров И.Н [и др.]. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 79-86.
12. Исследование влияния кристаллографической текстуры на кривые предельных деформаций листовых заготовок / Я.А. Ерисов [и др.]. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. т. 22, № 2, с. 118-123.
13. Арышенский Е.В. Подход к учету ориентированного роста зерен при моделировании рекристаллизации алюминиевых сплавов // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 133-139.
14. Разработка метода математического моделирования текстурных составляющих при прокатке Арышенский Е.В [и др.]. // Цветные металлы. 2023. № 6. С. 65-72.
15. Изучение эволюции кристаллографической текстуры при вытяжке низколегированного алюминиевого сплава Арышенский Е.В[и др.]. // Цветные металлы. 2022. № 5. С. 60-66.
16. Текстурные преобразования при отжиге алюминиевых фольг. 1. Сильные текстурные компоненты / Титоров Д.Б [и др.]. //ФММ. 2006. № 1. С. 91–97.
17. Рекристаллизованные алюминиевые сплавы с текстурой латуни и способы их получения: Пат. 2492260 Рос. Федерация № 2010117372/02; заявл. 10.11.2011; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. 37 с.
18. Валиев Р.З., Ценев Н.К., Кайбышев О.А., Мышляев М.М. Влияние структуры границ зерен на развитие механизмов сверхпластической деформации алюминиевых сплавов.// Металлургия. -1990,- №10.-С.191-196.

Информация об авторах

Е. А. Носова – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва.

В. А. Разживин - инженер кафедры «Обработки металлов давлением» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва.

А. А. Кузина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва.

А. В. Трибунский - инженер кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва.

REFERENCES

1. Abobaker M., Bouaziz O., Lebyodkin M., Lebedkina T. & Shashkov I.V. (2015) Avalanche dynamics in crumpled aluminum thin foils. *Scripta Materialia*, (99), 17-20. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.11.016>

2. Kals T.A. & Eckstein R. (2000) Miniaturization in sheet metal working. *J. Mater. Process. Technol.* (103) 95–101, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00391-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00391-5).
3. Wang C., Ma L., Ma X., Wang T., Jiang Z., Hasan M., Zhao J. (2023) Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of copper/aluminum composite thin strip. *Trans. Nonfer. Met. Soc. of China*, (33) (3) 701-713, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.188>.
4. Research of sheet thickness effect on mechanical and technological properties of Al-1%Mn aluminium alloy / Nosova, E., Lukonina, N., Khramova M., & Matviyuk, V. (2018). *Int. J. Nanotech.* (15 (4-5) 324-332. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2018.094789>.
5. Tribunskiy A.V., Nosova E.A., Aryshenskiy V.Yu. Effect of manganese and magnesium content and conditions of annealing on mechanical properties and cracking formation during bending of aluminum alloy AA3005 (2018) *Solid State Phenomena*. (284) 476-482, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.476>.
6. Diehl A., Engel U. & Geiger M. Influence of microstructure on the mechanical properties and the forming behaviour of very thin metal foils (2010) *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (47) 53–61, <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1851>.
7. Zenin, M. N. Guryev, A. M. Ivanov, S. G. Guryev, M. A. , & Chernykh, E. V. . (2022) Influence of high temperature annealing of aluminum alloys AMg6 and B95 on their structural phase state and strength properties *Fundamental Problems Of Modern Materials Science*, 19(1), 106-114. (In Russ.), DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.012.
8. Lukonina (Seliverstova) N.V. (2019) Influence of structural entropy on the stampability of aluminum alloy sheets AD0 (1011) and D16 (1163) (2019) *Polzunovsky Bulletin*. (2). 151-159 (In Russ.).
9. Ovchinnikov V. V., Gushchina N. V., Titorov D. B., Titorova D. V., Mozharovsky S. M., Filippov A. V (2010) Study of the texture of aluminum alloys after cold rolling, annealing and irradiation by ions Ar+ *Metal Phys. Met. Sci.*(109(1)) 83–92 (In Russ.).
10. Dhal A., Panigrahi S.K., Shunmugam M.S. (2023) A comprehensive study on size-effect, plastic anisotropy and microformability of aluminum with varied alloy chemistry, crystallographic texture, and microstructure *Mat. Sci. & Eng. A.* (876) 145111.
11. Petrov Y. N., Razzivin V. A., Vorobyev D. I., Smalzer A. V., Sargayeva T.S. (2023) Study of the influence of the anisotropy of the mechanical properties of aluminum alloy sheets of 8011a on the ultimate angle of incremental formation. *Vestnik of Siberian State Industrial University* (2 (44)) 79-86. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-79-86](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-79-86).
12. Yerisov J. A., Grechnikov F. V., Surudin S. V., & Razzivin V. A. (2020). Study of the influence of crystallographic texture on curves of extreme deformations of sheet blanks. *Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Bulletin*, 22 (2), 118-123. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-118-123.
13. Aryshenskiy E.V. (2020). Approach to the accounting of oriented grain growth in the modelling of the recrystallization of aluminum alloys. *Polzunovskiy Vestnik*, (2), 133-139. (In Russ.).
14. Aryshenskiy Y. V., Kononov S. V., Aryshenskiy V. Y. & Beglov E. D. (2023) Development of the method of mathematical modeling of textured components during rolling *Non-fer. Met.* (6). 65-72. . (In Russ.) DOI:10.17580/tsm.2023.06.09.
15. Aryshenskiy Y. V., Kononov S. V., Latushkin I. A., Lapshov M. A. (2022) .Study of evolution of crystallographic texture in low alloy aluminum alloy exhaust *Non-fer. Met.* (5). 60-66 DOI: 10.17580/tsm.2022.05.08 . (In Russ.).
16. Titorov D.B., Volkov V.A., Lebedev V.P., Mineev F.V., Titorova D.V. Texture conversion for annealing aluminum foil. 1. Strong texture components (2006). *Mat. Phys. Mech.* (1). C. 91–97 . (In Russ.).
17. Cheong S., Riodzha R. D., Magn'jusen P.E., Janar Кю ,Mui D.K.,Venema G.B., Ljuehllin E. (2013). Recrystallised aluminium alloys with brass texture and methods of their production. Pat. 2010117372/02. Russian Federation, published on 10.09.2013. *Bull. No. 25.* (In Russ.).
18. Valiev R.Z., Cenev N.K., Kaibyshev O.A., Myshlyayev.M.M. (1990) Influence of grain border structure on the development of mechanisms of superplastic deformation of aluminum alloys. *Metallurgy*. (10). 191-196. (In Russ.).

Information about the authors

E. A. Nosova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Technologies of Metals and Aviation Materials Science» of the S.P.Korolev Samara National Research University.

V. A. Razzivin - engineer of the department «Processing of metals by pressure» of the S.P.Korolev Samara National Research University.

A. A. Kuzina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Technologies of Metals and Aviation Materials Science» of the S.P.Korolev Samara National Research University.

A. V. Tribunskiy - Engineer of the Department of «Technologies of Metals and Aeronautical Science» of the S.P.Korolev Samara National Research University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 25 мая 2024; одобрена после рецензирования 20 сентября 2024; принята к публикации 04 октября 2024.

The article was received by the editorial board on 25 May 2024; approved after editing on 20 Sep 2024; accepted for publication on 04 Oct 2024.