



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.023



ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА AL-2CU-2MN

Алина Александровна Левагина¹, Евгений Владимирович Арышенский²,
Сергей Валерьевич Коновалов³, Александр Михайлович Дриц⁴,
Максим Сергеевич Тептерев⁵

^{1, 2, 3} Сибирский государственный индустриальный университет, Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

¹ aline.levagina@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7270-6008>

² arishenskiy_ev@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

^{4, 5} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия

⁴ dritsam@gmail.com, 0000-0002-9468-8736

⁵ tepterev.ms@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9018-1188>

Аннотация. В работе исследовано формирование микроструктуры и физико-механических свойств при производстве холоднокатанной ленты из алюминиевого сплава Al-2Cu-2Mn. В частности, изучено влияние деформационной (горячая и холодная прокатка) и термической обработки на механические свойства и удельную электропроводность сплавов. Показано, что полученное изделие сохраняет структуру нерекристаллизованной до температуры отжига 450 °С, а также имеет в составе мелкодисперсные вторичные выделения $Al_{20}Cu_2Mn_3$, образующиеся при данной температуре и повышающими прочность. Кроме того, данный сплав после отжига имеет также высокие значения электропроводности, что подтверждает возможность его применения в качестве электротехнической ленты. Предел прочности и удельная электропроводность изготовленной ленты, отожженной при температуре 400 °С, 3 часа составили 294 МПа и 29,3 МСм/м соответственно. Кроме того, установлено положительное влияние горячей прокатки на прочностные свойства, а именно на их термостабильность.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, АЛТЭК, предел прочности, микроструктура, удельная электропроводность.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>.

Для цитирования: Исследования формирования микроструктуры и свойств при производстве ленты из сплава Al-2Cu-2Mn / А. А. Левагина [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 187–196. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.023. EDN: <https://elibrary.ru/HNJCCF>.

Original article

STUDIES OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES FORMATION DURING PRODUCTION OF AL-2CU-2MN ALLOY STRIP

Alina A. Levagina¹, Evgenii V. Aryshenskiy², Sergei V. Konovalov³,
Alexander M. Drits⁴, Maksim S. Tepterev⁵

^{1, 2, 3} Siberian State Industrial University, Kirova str., 42, 654007, Novokuzneck, Russia

¹ aline.levagina@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7270-6008>

² arishenskiy_ev@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

^{4, 5} Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, 443086, Samara, Russia

⁴ dritsam@gmail.com, 0000-0002-9468-8736

⁵ tepterev.ms@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9018-1188>

Abstract. The paper investigates microstructure as well as physical and mechanical properties formation during production of cold-rolled strip from Al-2Cu-2Mn aluminum alloy. Specifically, the effect of deformation (hot

© Левагина А. А., Арышенский Е. В., Коновалов С. В., Дриц А. М., Тептерев М. С., 2025

and cold rolling) and heat treatment on alloys mechanical properties and electrical conductivity has been studied. It is demonstrated, that the produced article retains its non-recrystallized structure up to the annealing temperature of 450°C, and also contains finely dispersed secondary $Al_{20}Cu_2Mn_3$ precipitates, formed at this temperature and increasing alloy strength. In addition, this alloy has high electrical conductivity value after annealing, justifying its application as EC grade material. The produced strip, annealed during 3 hours at 400°C, has ultimate strength and electrical conductivity of 294 MPa and 29.3 MS/m, respectively. In addition, it was established, that hot rolling had positive effect on strength properties, thermal stability, specifically.

Keywords: aluminum alloys, ALTEK, ultimate strength, microstructure, electrical conductivity.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>.

For citation: Levagina, A. O., Aryshenskii, E. V., Kononov, S. V., Drita, A. M. & Teptere, M. S. (2025). Studies of microstructure and properties formation during production of Al-2Cu-2Mn alloy strip. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 187-196. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.023. EDN: <https://elibrary.ru/HNJCCF>.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника играет важную роль в различных сферах жизни страны, начиная от промышленности и энергетики, заканчивая повседневным бытом. В контексте увеличения потребления электроэнергии [1–2] и повышенного спроса на легкие и прочные материалы возникает необходимость разработки новых алюминиевых сплавов, отвечающих требованиям электротехнической промышленности. В том числе они требуются для проводов и обмоток трансформаторов, которые должны иметь не только высокую удельную электропроводность, но также и механическую прочность [3–6]. Это объясняется тем, что провода и кабели часто подвергаются внешним механическим нагрузкам ввиду воздействия внешних факторов, например, таких как погодные явления (ветровые нагрузки, гололедные образования) [7–9]. Такие нагрузки приводят к возникновению вибраций и галопированию [8] проводов, которое можно описать как колебание проводника в вертикальной плоскости, что может привести к обрыву жил или разрушению арматуры. Возникновение колебаний может быть также связано с увеличением силы притяжения между проводами вследствие воздействия переходных процессов при подаче напряжения в линию или скачкообразного изменения нагрузки. Однако такое явление имеет, как правило, разовый эффект и встречается реже, чем колебания, возникающие под действием воздушного потока [8].

Для обмоток трансформаторов механическая прочность также является важным аспектом, поскольку она обеспечивает сохранность обмотки при возникновении короткого замыкания. Механические силы в обмотках возникают вследствие взаимодействия тока с магнитным полем устройства [10].

Как известно, в электротехнической промышленности в качестве проводников применяются медь и алюминий, а также их сплавы. Обычно в обмотках трансформаторов используют алюминий с гарантированными электрическими свойствами марки АЕ и медь марок М00, М1 [9, 11–14]. Алюминиевую катанку для проводов и кабелей также изготавливают из металлов высокой и технической чистоты, а также из высокопрочных сплавов на основе системы Al-Si-Mg (АВЕ, 6101, 6201), Al-Fe (8030, 8176), Al-Zr (АЦЕ) [12]. При сравнении меди и алюминия следует отметить, что медь обладает более высокой прочностью и меньшим электросопротивлением. Одна-

ко в последние годы наблюдается тенденция замещения меди алюминием, что обусловлено несколькими важными факторами. Алюминий значительно дешевле меди, что делает его более привлекательным для массового производства проводов и кабелей. Кроме того, алюминий обладает низким удельным весом, что является важным преимуществом для многих устройств и конструкций. Алюминиевые сплавы, по сравнению с чистым алюминием, обладают меньшей удельной электропроводностью из-за содержания легирующих элементов, но при этом обладают повышенной прочностью. В то же время большинство алюминиевых сплавов, за исключением алюминий-циркониевых, не обладают достаточной термостойкостью [15–16]. Это обстоятельство негативно сказывается на сроке службы изделий, так как проводники под длительным воздействием высоких температур теряют свою удельную электропроводность и становятся менее надежными. Таким образом, разработка новых термостойких алюминиевых сплавов для электротехнической промышленности является актуальной задачей.

Материалами для электротехники, которые могли бы совмещать в себе высокую прочность, удовлетворительную удельную электропроводность и термостабильность, являются недавно разработанные проф. Н.А. Беловым сплавы Al-Cu-Mn, получившие также название АЛТЭК [17–34]. Уникальные свойства системы объясняются правильно подобранными химическими концентрациями элементов, образующие равновесную, почти двухфазную структуру [30]. Так, при концентрациях до 2 %Cu и до 2 %Mn возможно сформировать вторичные выделения фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$ (Т), которые более термостабильны по сравнению с выделениями фазы Al_2Cu (Θ), характерных для других жаропрочных медесодержащих сплавов. Они затрудняют рекристаллизацию, сохраняя деформационное упрочнение до 400 °С. Выделения имеют небольшой размер – 100–500 нм. Так, при термической обработке сплавов возрастает удельная электропроводность благодаря выпадению марганецсодержащих частиц из твердого пересыщенного раствора. В то же время термостойкие частицы начинают препятствовать движению дислокаций, затрудняя процессы рекристаллизации и возврата, благодаря чему прочность сплавов повышается до температуры отжига 400 °С.

Существующие исследования сплавов АЛТЭК

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Al-2Cu-2Mn

в основном посвящены вариациям химических составов, в которых содержание меди составляет 1,5–2 % а марганца 1,5 % [17–23, 25–34]. Кроме того, в этих сплавах могут использоваться добавки других легирующих элементов [19–22, 25, 33–34]. Последние исследования показали, что весьма перспективными являются сплавы с содержанием меди и марганца 2 % [17–18, 25, 29–30, 34].

Проведенные исследования показали, что структура сплавов типа АЛТЭК сильно зависит от параметров термомеханической обработки [17–18, 25, 29–30, 34]. С учетом особенностей промышленной технологии, которая, как правило, преду-

Таблица 1 – Химические составы модельных сплавов

Table 1 – Chemical compositions of model alloys

Шифр плавки	Cu, %	Mn, %	Fe, %	Si, %	Al, %	кокиль
1	2,01	2,06	0,07	0,04	95,82	стальной
2						медный

Было отлито 2 слитка размерами: 40x120x450 мм в стальном кокиле № 1 и 12x50x200 мм в медном № 2. Скорость охлаждения сплава в стальном 2 °С/с; для медного кокиля – 10 °С/с [39]. Для приготовления расплава использовался алюминий марки А85Si, медь М1, таблетки Мп90, лигатура Zr5. Для плавки

считывает многостадийную горячую прокатку [35–36], формирование структуры в промышленных и лабораторных условиях может достаточно сильно различаться [37–38]. Целью данной статьи является изучение влияния технологической схемы, включающей в себя как холодную, так и горячую прокатку на формирование микроструктуры и механических свойств в сплаве Al-2%Mn-2%Cu.

МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были разработаны химические составы системы АЛТЭК (табл. 1).

использовалась плавильная печь Xtoki. Далее слитки подвергались деформированию прокатным станом DIMA 300 до толщины 1 мм. Такая толщина была выбрана связи с тем, что толщина ленты для обмотки трансформаторов составляет 0,22–2 мм [3]. Режимы деформации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы деформации / Table 2 – Deformation modes

№	Операция	Условия	Единичное обжатие, %	Полученное изделие
1	Горячая прокатка	–	–	Лист толщиной 2 мм
1.1	Слиток из стального кокиля	С 40 мм до 2 мм, температура 380–420 °С	93	
1.2	Слиток из медного кокиля	С 12 мм до 2 мм, температура 380–420 °С	83	
2	Промежуточный отжиг	30 мин, 350 °С	–	Отоженный лист
3	Холодная прокатка	С 2 мм до 1 мм,	50	Лист толщиной 1 мм

Промежуточный отжиг проводился в муфельной печи THERM CONCEPT KM 70/06/A при температуре 350 °С, 30 минут. Исследовалось изменение механических свойств (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение) в зависимости от температуры отжига (300...500 °С с шагом 50 °С).

Для измерения удельной электрической проводимости в зависимости от этапа деформационной обработки использовался вихретоковый измеритель для цветных металлов ВЗ-27НЦ/4-5 согласно ГОСТ 27333-87. Точность измерений составляла ± 2 % при температуре в диапазоне от 25 до 30 °С.

Были проведены испытания алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине Zwick / Roell Z050 для определения их механических свойств методом одноосного растяжения в соответствии с ISO 6892-1 при комнатной температуре. Расчеты предела текучести, предела прочности и относительного удлинения по результатам испытаний были выполнены согласно ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 11150-84.

Также исследовалась зеренная структура и микроструктура (наличие частиц, их состав, размер и форма) сплавов в процессе деформационной обработки. Исследование зеренной структуры образцов проводилось с использованием оптического микроскопа «Axiovert-40 MAT» (Carl Zeiss, Германия).

Исследование размеров и распределения дисперсидов, а также более крупных интерметаллидных частиц проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ)

модели JEOL 6390A (Япония). Микроскоп оснащен электронно-зондовыми приставками для локального микроанализа (EDS, WDS). Для изучения химического состава интерметаллидов применялся энергодисперсный спектрометр (EDS, OXFORDINSTRUMENTS) с точностью до 0,01 %. Подготовка образцов включала несколько этапов: вырезку, механическое шлифование, полирование и электрополирование в фтороборном электролите, состав которого был следующим: борная кислота – 11 г, фтористоводородная кислота – 30 мл, дистиллированная вода – 2200 мл. Электрополирование осуществлялось при температуре 85–110 °С и напряжении 10–30 В в электролите, состоящем из: H₃PO₄ – 500 мл, H₂SO₄ – 300 мл, CrO₃ – 50 г и H₂O – 50 мл. Для каждого образца было выполнено 10 снимков, что позволило собрать статистические данные, необходимые для более точного определения размеров частиц. Чтобы обеспечить точность подсчета количества частиц, изображения подвергались повышению контрастности до тех пор, пока не начали проявляться "шумовые" точки. Для обработки изображений и достижения оптимального контраста алюминиевой матрицы и вторичных фаз использовалась программа Image J.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктура новых сплавов в литом состоянии представлена на рисунке 1.

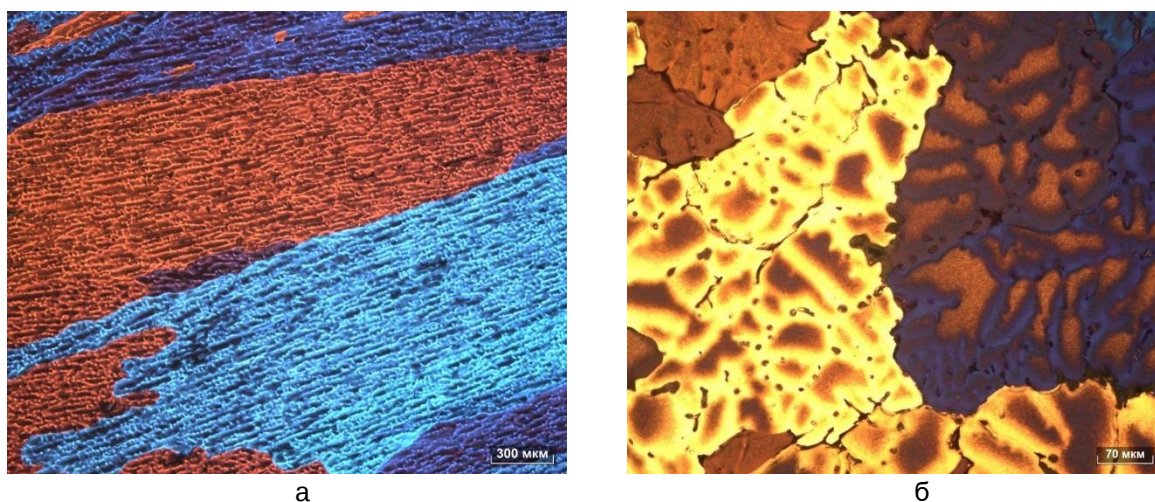


Рисунок 1 – Микроструктура вариаций сплава АЛТЭК в литом состоянии: а – № 1; б – № 2
Figure 1 – Microstructure of variations of the ALTEK alloy in the cast state: a - No. 1; b - No. 2

При двух разных скоростях кристаллизации наблюдается дендритная структура (рис. 1 а, б). Однако в случае литья в стальной кокиль она более крупная, с зернами размером до 3 мм, а медный – более мелкая, до 200 мкм. Такой размер зерна в несколько миллиметров в целом характерен для низколегируемых алюминиевых сплавов при их литье в стальной кокиль [40]. В то же время повышение скорости охлаждения за счет литья в медный кокиль, как и в большинстве описанных в литературе случаях [41], способствует уменьшению размера зерна.

Согласно данным оптической микроскопии, после горячей прокатки дендритная структура становится деформированной (рис 2, а). В процессе обработки зерна вытягиваются в направлении прокатки. Стоит заметить, что после отжига (рис. 2, б) структура не рекристаллизуется. После холодной прокатки зерно продолжает вытягиваться и деформироваться. Таким

образом, при всем процессе производства сплава АЛТЭК рекристаллизации не происходит. Эти данные соотносятся с результатами, полученными в исследованиях [17–18, 31, 34], в которых также наблюдается деформированная структура после холодной прокатки. Также стоит отметить, что в данном исследовании показано, что нерекристаллизованная текстура наблюдается и после горячей прокатки. Это говорит о том, что при нагреве до температуры горячей прокатки и непосредственно в ходе этой операции происходит выделение мелкодисперсных частиц, затрудняющих процесс рекристаллизации. Это коррелирует с данными, полученными в [21, 42–43] для сплавов Al–2Cu–1.5Mn–1Mg–1Zn, согласно которым определенное количество частиц уже формируется на данной стадии термической обработки.

Результаты сканирующей электронной микроскопии литых образцов и химический состав частиц представлены на рисунке 3 и в таблице 3.

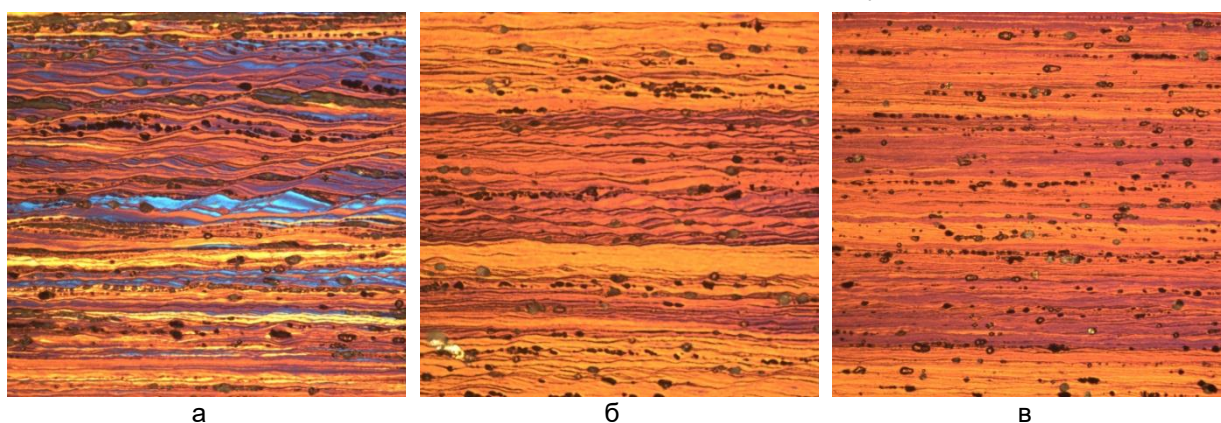


Рисунок 2 – Микроструктура сплавов АЛТЭК на этапах обработки: а – после горячей прокатки, 2 мм; б – после горячей прокатки и отжига, 2 мм; в – после холодной прокатки, 1 мм

Figure 2 – The microstructure of ALTEK alloys at the processing stages: a - after hot rolling, 2mm; b - after hot rolling and annealing, 2mm; c - after cold rolling, 1 mm

Таблица 3 – Химический состав частиц Al_2Cu , (ат,%)

Table 3 – Chemical composition of the particles Al_2Cu , (at, %)

Al, %	Cu, %	Mn, %	Fe, %	Si, %
78,84	15,91	3,64	1,25	0,32

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Al-2Cu-2Mn

В литом состоянии в основном присутствуют частицы, близкие по химическому составу Al_2Cu (рис. 3, таблица № 3). Присутствие марганца в частицах можно объяснить высокой концентрацией элемента в матрице. В данном случае частицы имеют различную морфологию, в том числе в виде шарообразной, каплевидной, а также в виде прожилков. Изменение скорости литья практически не влияет как на химическую композицию частиц, так на их линейные размеры. Согласно данным сканирующей микроскопии,

средний размер интерметаллидов в литом состоянии в слитке из стального кокиля – 9 мкм, в слитке из медного – 10,88 мкм. Данные частицы эвтектического происхождения образовались в результате неравновесной кристаллизации [17–18]. В целом, полученные в данном исследовании результаты коррелируются с исследованиями [17–18, 31, 34], согласно которым частицы Al_2Cu в литом состоянии также имеют шарообразную и иногда каплевидную формы размером около 3–10 мкм.

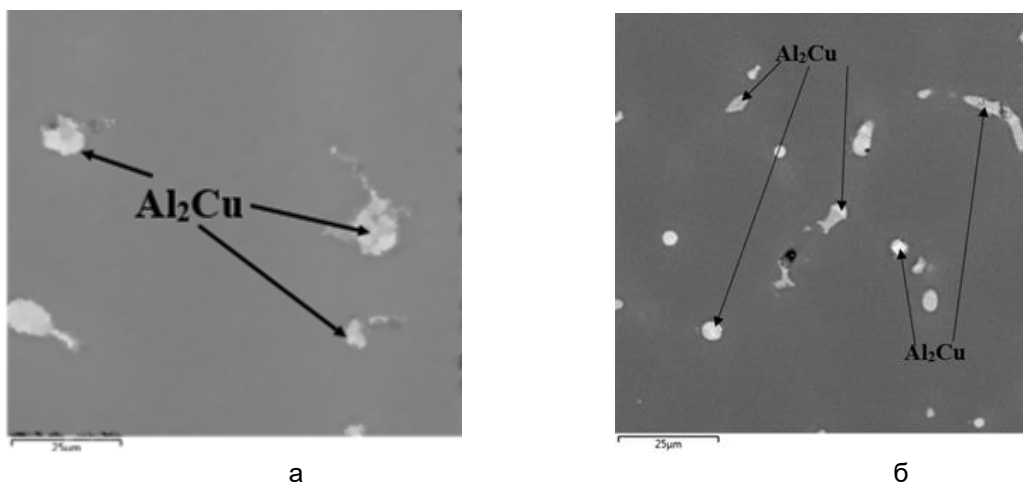


Рисунок 3 – Частицы в литом состоянии: а – стальной кокиль; б – слиток медный кокиль
Figure 3 – Particles in the cast state: a - steel coquille; b - copper coquille ingot

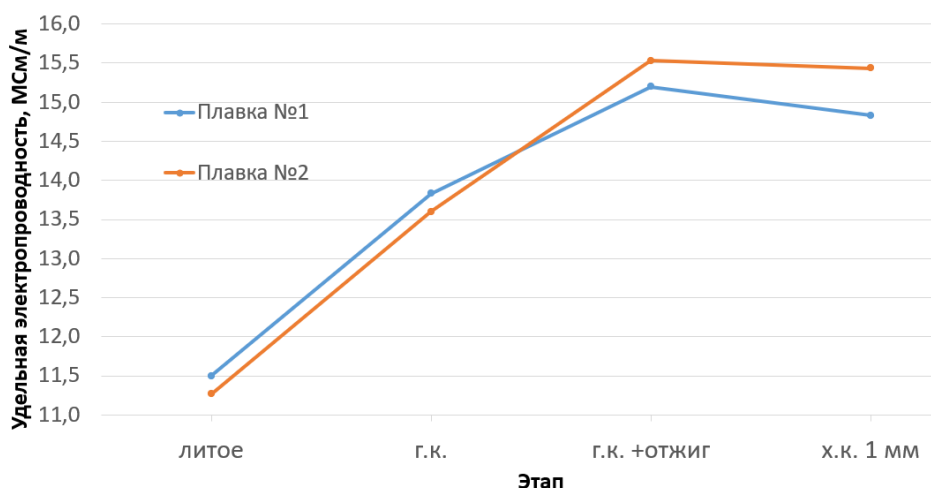


Рисунок 4 – Изменение электропроводности во время деформационной обработки
Figure 4 – Change in electrical conductivity during deformation treatment

В литом состоянии наблюдается минимальная удельная электропроводность (рисунок 4). Это объясняется тем, что большинство легирующих элементов находится в пересыщенном твердом растворе. Данные соотносятся с результатами сканирующей микроскопии: согласно наблюдается лишь небольшое количество крупных интерметаллидов типа Al_2Cu , а все остальные элементы находятся в твердом растворе. Полученные значения близки к тем, что имеют сплавы Al-2% Cu-2 wt.% Mn с небольшими добавками Fe и Si. В ходе горячей прокатки удельная электропроводность повышается до

13,6 и 13,8 МСм/м для № 1 и № 2 соответственно. После промежуточного отжига удельная электропроводность вновь возрастает и достигает 15,5 МСм/м 15,2 МСм/м для № 1 и № 2 соответственно. Повышение электропроводности вместе с отсутствием рекристаллизации при горячей прокатке говорит начале о распаде пересыщенного твердого раствора и появления мелкодисперсных частиц. Для сплавов системы АЛТЭК характерно увеличение электропроводности после проведения термической обработки выше 300 °С [31]. В то же время говорить о полном распаде пересыщенного твердо-

го раствора в данном случае нельзя, т. к., на завершающем этапе процесса данного процесса удельная электропроводность может повышаться и до 29 МСм/м [31]. Основным типом формирующихся частиц являются мелкодисперстные $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ [17–18, 31, 34]. При холодной деформации удельная электропроводность незначительно снижается, что может быть объяснено влиянием деформационной обработки, увеличивающей плотность дислокаций [37–38].

Согласно рисунку 5, на котором представлена зависимость электропроводности от режима отжига, разная скорость охлаждения незначительно влияет на удельную электропроводность.

При отжиге до 300 °С продолжается распад пересыщенного твердого раствора, сопровождающийся повышением электропроводности (рис. 5). При температуре отжига 400 °С распад активизируется, что можно объяснить выделение вторичных наноразмерных частиц $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ [17–18, 31].

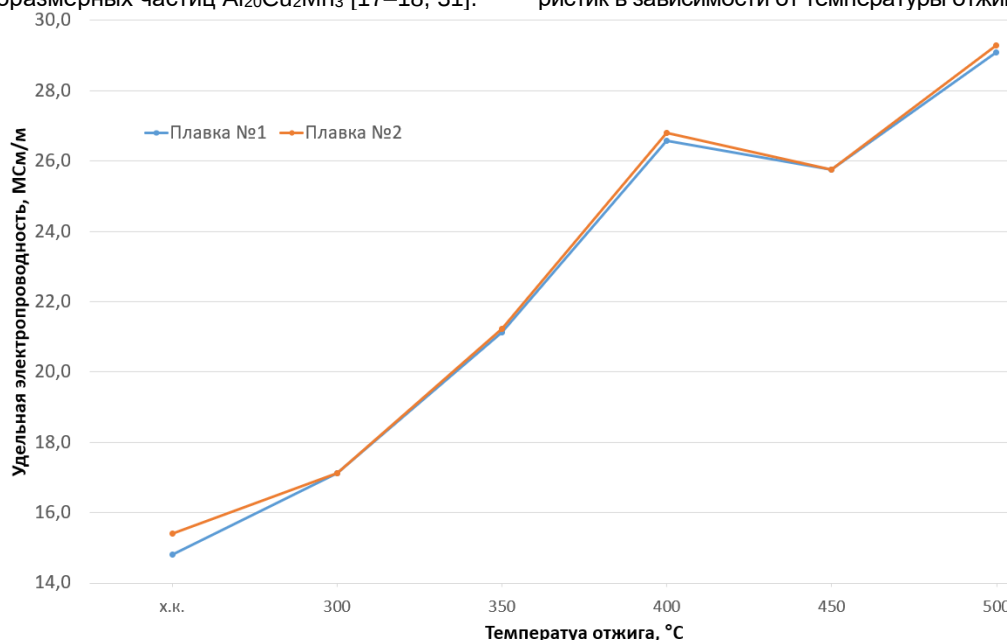


Рисунок 5 – Изменение электропроводности в зависимости от температур отжига

Figure 5 – Change in electrical conductivity depending on annealing temperatures

Согласно графикам, разная скорость охлаждения также незначительно повлияла на изменение механических свойств. Отжики с температурой 400 °С лишь незначительно снижают предел прочности. Это означает, что процессы рекристаллизации и возврата блокируются мелкодисперсными частицами. Это еще раз подтверждает, что в процессе горячей прокатки выделяется достаточно частиц $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ для блокирования процессов рекристаллизации и возврата. При отжиге при температуре 450 °С начинают проходить процессы возврата, что и обуславливает снижение прочностных свойств изделия.

Условный предел текучести имеет практически идентичную зависимость: значения незначительно снижаются при температурах отжига 300–400 °С и более резко при температуре 450 °С. Далее предел текучести повышается до 210 МПа для плавки

При 450 °С наблюдается некоторое уменьшение электропроводности, что может быть связано с растворением частиц Al_2Cu . Частицы начинают расти при температуре отжига 500 °С, после которого увеличение электропроводности и механических свойств наблюдаться не будет. При отжиге 500 °С происходит максимальное повышение электропроводности, что может быть связано с продолжением распада пересыщенного твердого раствора и формированием выпадением частиц $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$. На данном этапе удельная электропроводность и составляет 29,3 МСм/м и 29,2 МСм/м для № 2 и № 1 соответственно.

Структура остается деформированной с зернами, вытянутыми в направлении прокатки, если температура меньше, чем 500 °С (рис. 6). При достижении данной температуры происходит процесс рекристаллизации с образованием нового зерна.

Рассмотрим изменение механических характеристик в зависимости от температуры отжига (рис. 7).

№ 2 и до 200 МПа для № 1 соответственно. Стоит отметить, что некоторое повышение прочностных свойств при отжиге с температурами 500 °С может быть связано с двумя факторами. Необходимо отметить, что рост механических свойств при отжиге 500 °С может объясняться растворением крупных интерметаллидов типа Al_2Cu , способствующих твердо растворному упрочнению. Еще одной причиной роста прочностных свойств может быть процесс измельчения зерна, связанный с рекристаллизацией.

Относительное удлинение, в отличие от прочностных свойств, растет при повышении отжига (рис. 7, в).

В целом, характер изменения механических свойств, полученных в данной работе, коррелирует с характером изменения микротвердости, представленных в работах [17–18, 22, 31–32].

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Al-2Cu-2Mn

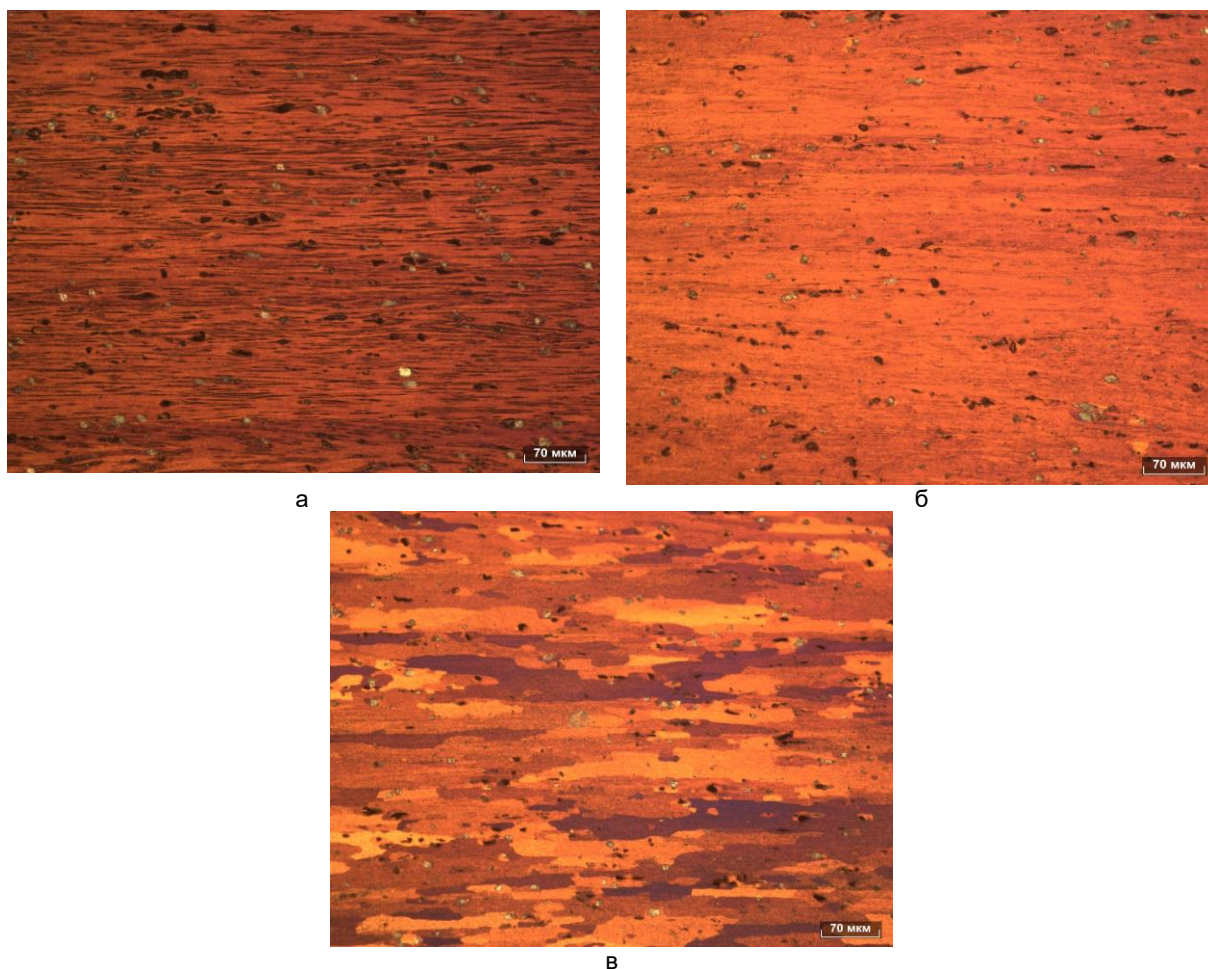


Рисунок 6 – Микроструктура плавки № 1: а – отжиг 300 °С, 3 часа; б – отжиг 450 °С, 3 часа; в – отжиг 500 °С, 3 часа

Figure 6 – Microstructure floatplates No. 1: a - annealing 300 °C, 3 hours; b-annealing 450 °C, 3 hours; c-annealing 500 °C, 3 hours

ОБСУЖДЕНИЕ

Основное отличие данной работы от других исследований [17–18, 22, 31–32], посвященных формированию микроструктуры и механических свойств в сплавах системы АЛТЭК, заключается в наличии операции горячей прокатки. Как видно из анализа механических свойств, электропроводности и данных оптической микроскопии, горячая прокатка позволяет в достаточном количестве получить термостойкие частицы для сохранения прочности при отжиге до 400 °С. Добавление горячей прокатки позволило получить более высокий уровень механических свойств, чем в работе [17]. В ней были исследованы механические свойства сплавов АЛТЭК (Al-2Cu-1,75%Mn (2Cu) и 3%Cu-2%Mn 1,73% (3Cu)), полученных с помощью холодной прокатки из слитков листов с толщиной 0,5 мм. Предел прочности для сплавов 2Cu и 3Cu соответственно равен 277 МПа и 274 МПа при температуре отжига 400 °С продолжительностью 3 часа. Однако в настоящем исследовании после данной температурной обработки наблюдается более высокой предел прочности, равный 294 МПа. Стоит отметить, что для листов из сплава АЛТЭК, при получении которых применяется только холод-

ная прокатка, наблюдается тенденция снижения прочности после отжига температурой 200 °С и выше. Например, в исследованиях [17, 32] изучались сплавы с химическим составом, близкими к рассматриваемому в данной работе. При отжиге в диапазоне температур 300–400 °С сплав Al-Cu-Mn-Zr продемонстрировал уменьшение твердости примерно на 5,6 %, а сплав Al-Cu-Mn показывал снижение твердости около 4,3 %. В тоже время рассматриваемые в данной работе плавки № 1 и № 2 показали уменьшение прочностных свойств на 1,2 % и 0 % соответственно. Составы с 1,5 % содержанием Cu и Mn 1,5 % п [17, 31–32], деформированные только холодной прокаткой, также имеют тенденцию к снижению твердости после 200 °С.

Как говорилось выше, в трансформаторах применяется отечественная фольга технической чистоты А5Е, А7Е, а также зарубежная фольга 1050, 1060, 1070, 1350. Сплавы АЛТЭК обладают меньшей удельной электропроводностью по сравнению с применяемыми сплавами, чья удельная электропроводность составляет не менее 35–36 МСм/м, в то время как для данного сплава АЛТЭК в отожженном состоянии – 29,3 МСм/м. Однако сплавы АЛТЭК обладают большей прочностью,

что может увеличить надежность и сроки применения электротехники.

Предел прочности отечественных сплавов

составляет 40–60 МПа, зарубежных – 60–95 МПа, в то время как сплавов АЛТЭК при той же толщине – 294 МПа.

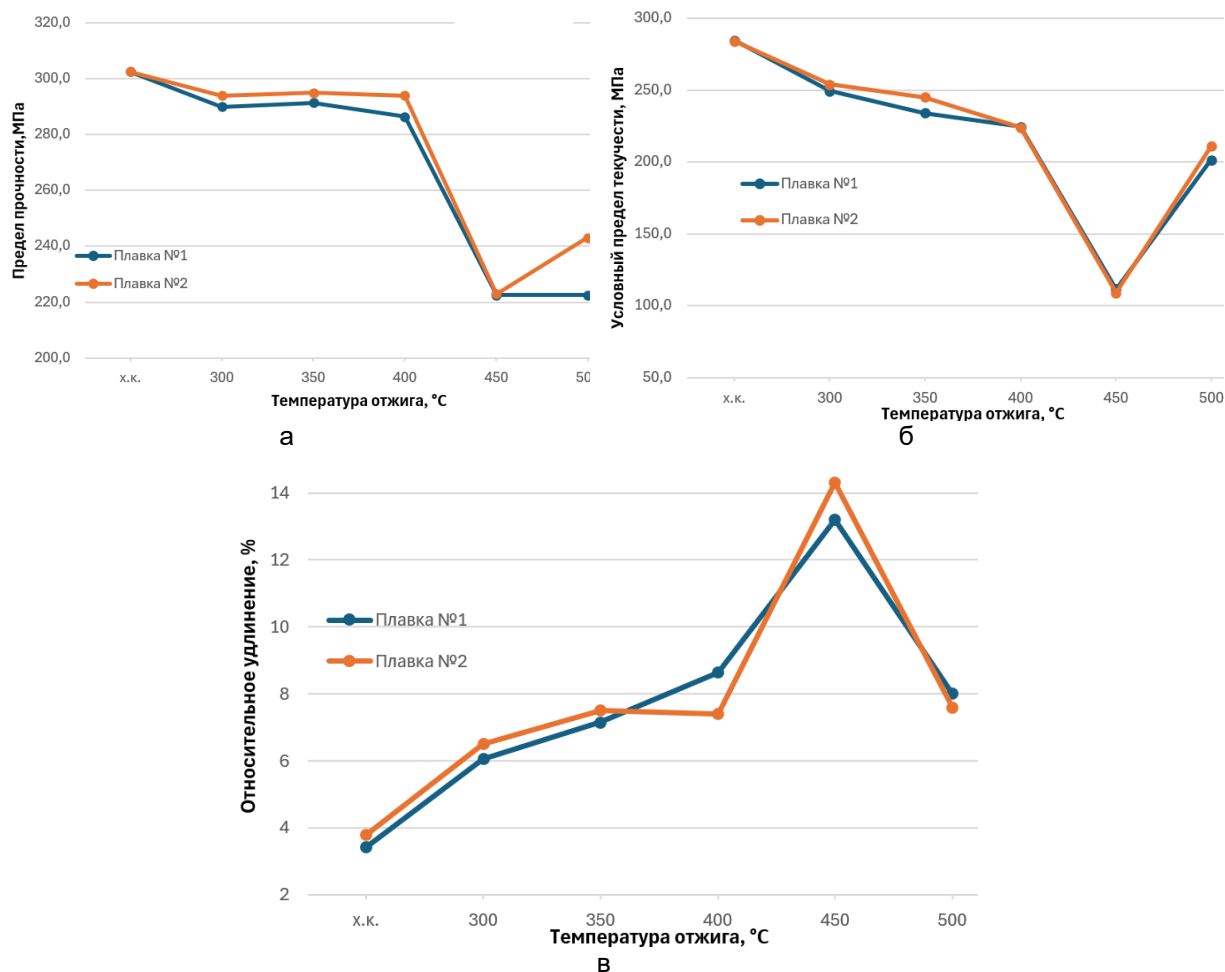


Рисунок 7 – Изменение механических свойств прокатанных листов толщиной 1 мм в зависимости от температуры отжига: а – предел прочности, б – условный предел текучести, в – относительное удлинение
Figure 7 – Changes in the mechanical properties of rolled sheets with a thickness of 1 mm depending on the annealing temperature: a 0 tensile strength, b 0 conditional yield strength, c 0 elongation

ВЫВОДЫ

1. После термдеформационной обработки исследуемый сплав Al-2Cu-2Mn демонстрирует высокие прочностные показатели. Предел прочности сплава в холоднокатаном состоянии для второй плавки составил 303 МПа и незначительно снизился после отжига 300 °C до 294 МПа. Значения предела прочности не снижались при режимах отжига 350 °C, 400 °C 3 часа, что указывает на термостабильность состава. Кроме того после отжига исследуемые в данной работе сплав имеет достаточно высокие показатели электропроводности, достигающих 29,3 МСм/м. Сравнение прочностных свойств, применяемых в трансформаторах иностранных сплавов (отожженные 1050, 1060, 1070, 1350, имеющие предел прочности 60–95 МПа при толщине 0,2 мм) показывает что предел прочности исследуемого в данной работе сплава превышает из значения в 3 раз.

2. Горячая прокатка сплавов АЛТЭК способ-

ствует большей термостабильности составов и росту механических свойств при отжигах до 400 °C. Плавки сплава № 1 и № 2 показали уменьшение прочностных свойств на 1,2 % и 0 % соответственно, что меньше, чем у холоднокатаных (без предшествующей горячей прокатки – около 4,3 %) сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Shulginov, N. "The Russian fuel and energy complex in 2023 continued to reliably provide consumers" Ministry of Energy of the Russian Federation (2024). Retrieved from <https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-rossiyskiy-tek-v-2023-godu-prodolzhit-nadyezhno-obespechivat-potrebitely>. (In Russ.).
- Shulginov, N. "Growth of electricity consumption in the autumn-spring period" Ministry of Energy of the Russian Federation. (2024). Retrieved from <https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-rossiyskiy-tek-v-2023-godu-prodolzhit-nadyezhno-obespechivat-potrebitely>. (In Russ.).

- center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-v-proshedshem-osenne-zimnem-sezone-elektropotreblenie-vyroslo-na-3-5- (In Russ.).
3. Kisilitsyn, A.L. (2001). Transformers: a textbook on the course "electromechanics". (In Russ.).
 4. 8. Conductive conductors for cables, wires and cords. (2021). (HOST 22483-2021).
 5. Non-insulated wires for overhead power lines. (2019). (HOST 839-2019).
 6. . Wires for overhead power lines twisted from profiled wires with concentric coils. (2014). (HOST 62219-2014).
 7. Mustyats, A.V., Serokhvostov, A.A., Myakushko, R.V. & Ovchelupova, A.V. (2023). Methods of reducing the accident rate of overhead power lines by eliminating icy-frost deposits. *Energynet*, (1-2(1)), 43. (In Russ.). DOI: 10.57112/E231-957.
 8. Tsarev, I.B. (2024). Galloping wires of overhead power lines and the fight against it. *Scientific aspect - Electrical Engineering*, (5), 3123. (In Russ.).
 9. Fursanov, M.I., Farino, A.A. & Gorudko, P.S. (2017). Icy accidents at power lines are the causes and ways to prevent them. *Energy and management*, (2), 25-29. (In Russ.).
 10. Tikhomirov, P.M. (1986). Calculation of transformers: Textbook for universities. (In Russ.).
 11. Nemontov, V.A. (2021). Electrical engineering materials in mechatronics: a textbook. (In Russ.).
 12. Loparev, V.V. (2022). Aluminum and its alloys for the domestic cable industry. *Cables and wires*, (6), 12-25. (In Russ.). DOI: 10.52350/2072215X_2022_6_12.
 13. Filina, A.V. & Morozov, I.S. (2019). On the influence of the properties of electrical materials on the efficiency of electrical devices. In prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. 281-284. (In Russ.).
 14. Filina, A.V. & Nosovets, A.A. (2019). Electrical materials as a means of improving the efficiency of electrical equipment. In *Modern Tool Systems, Information technology and Innovation*. 205-208. (In Russ.).
 15. Antipov, V.V., Senatorova, O.G., Tkachenko, E.A. & Vakhromov, R.O. (2012). Aluminum deformable alloys. *Aviation Materials and Technologies*, (5), 167-182. (In Russ.).
 16. Kaufman, J.G. (2000). Introduction to aluminum alloys and tempers. ASM international.
 17. Belov, N.A., Korotkova, N.O., Shurkin, P.K. & Aksenov, A.A. (2020). Substantiation of copper concentration in heat-resistant deformable aluminum alloys containing 2 wt.% Mn. *Physics of Metals and Metallurgy*, (121(12)), 1315-1323. (In Russ.).
 18. Korotkova, N.O., Shurkin, P.K., Cherkasov, S.O., Aksenov, A.A. & Finogeev, A.S. (2022). Influence of copper concentration and annealing temperature on the structure and mechanical properties of ingots and cold-rolled sheets of Al-2% Mn alloy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*, (28(1)), 67-78. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2022-1-67-78.
 19. Belov, N.A., Korotkova, N.O., Akopyan, T.K. & Pesin, A.M. (2019). Phase composition and mechanical properties of Al-1.5% Cu-1.5% Mn-0.35% Zr (Fe, Si) wire alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, (782), 735-746. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.240.
 20. Petrova, A.N., Rasposienko, D.Y., Astafyev, V.V. & Yakovleva, A.O. (2023). Structure and strength of Al-Mn-Cu-Zr-Cr-Fe ALTEC alloy after radial-shear rolling. *Letters on Materials*, (13(2)), 177-182. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-177-182.
 21. Belov, N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Cherkasov, S. & Avxentieva, N. (2023). Effect of Fe-Bearing Phases on the Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Al-2wt.% Cu-1.5 wt.% Mn (Mg, Zn) Non-Heat Treatable Sheet Alloy. *Metals*, (13(11)), 1911. DOI: 10.3390/met13111911.
 22. Belov, N., Korotkova, N., Akopyan, T. & Tsydenov, K. (2019). Simultaneous increase of electrical conductivity and hardness of Al-1.5 wt.% Mn alloy by addition of 1.5 wt.% Cu and 0.5 wt.% Zr. *Metals*, (9(12)), 1246. DOI: 10.3390/met9121246.
 23. Belov, N.A. (2011). Economically alloyed heat-resistant aluminum alloys: principles of optimization of phase composition. *Aviation materials and technologies*, (2 (19)), 6-11. (In Russ.).
 24. Chirkov, E.F. (2002). On the nature of the effects of Cu and Mg on the evolution of the structure and heat resistance of aluminum alloys of the Al-Cu-Mg system. *Technology of light alloys*, (4), 64-68. (In Russ.).
 25. Glukhikh, Ya.M. (2023). The effect of annealing on the mechanical properties of sheets and welded joints of the alloy Al-2% Cu-2% Mn-2% Mg. *SMIS-2023. Quality Management Technology=SMAC 2023. Quality management technology: materials of the International*, 242. (In Russ.).
 26. Zupanič, F. & Bončina, T. (2022). Heat-Resistant Al-Alloys with Quasicrystalline and L12-Precipitates. *Solid State Phenomena*, (327), 26-32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.327.26.
 27. Toleuova, A., Balbekova, B. & Erakhtina, I. (2019, March). Optimization of the Composition and Structure of Deformable Heat Resistant Aluminum Alloy. In *Materials Science Forum* (Vol. 946, pp. 156-161). *Trans Tech Publications Ltd*. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.156.
 28. Dar, S.M. & Liao, H. (2019). Creep behavior of heat resistant Al-Cu-Mn alloys strengthened by fine (θ') and coarse ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$) second phase particles. *Materials Science and Engineering: A*, (763), 138062. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138062.
 29. Belov, N., Cherkasov, S., Korotkova, N. & Tsydenov, K. Manufacturability and structure evolution of cylindrical ingots of Al-2% Cu-2% Mn alloy during pressure treatment. *Non-ferrous metals*, (1), 77-82. (In Russ.). DOI: 10.17580/tsm.2023.01.10.
 30. Korotkova, N.O., Shurkin, P.K., Cherkasov, S.O., Aksenov, A.A. & Finogeev, A.S. (2022). Influence of copper concentration and annealing temperature on the structure and mechanical properties of ingots and cold-rolled sheets of Al-2% Mn alloy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*, (28(1)), 67-78. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2022-1-67-78.
 31. 35. Belov, N.A., Korotkova, N.O., Cherkasov, S.O. & Aksenov, A.A. (2020). Electrical conductivity and hardness of Al-1.5% Mn and Al-1.5% Mn-1.5% Cu (wt.%) cold-rolled sheets: comparative analysis. *Tsvetnye Metally*, (4), 70-76. (In Russ.). DOI:

10.17580/tsm.2020.04.0.

32.Belov, N.A. & Alabin, A.N. (2013, September). Energy efficient technology for Al-Cu-Mn-Zr sheet alloys. In Materials Science Forum (Vol. 765, pp. 13-17). Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.765.13.

33. Tsydenov, K., Belov, N. (2023). Investigation of the effect of magnesium and zinc on the structure and mechanical properties of al-2% cu-1.5% mn alloy sheets. Llc "Zanevskaya site", a company for the production of modern high-entropy materials, 153-154.

34.Belov, N.A. (2022). Substantiation of the composition and structure of deformable alloys based on the Al-Cu-Mn (Zr) system, which do not require homogenization and quenching. In Mashtech 2022. Innovative technologies, equipment and material blanks in mechanical engineering, 10-13. (In Russ.).

35.Naizabekov, A.B., Lezhnev, S.N., Aina-bekova, S.S., Koinov, T.A. & Yordanova, R.M. (2019). Technology of processing non-ferrous metals and alloys.

36.Malleshham, P. & Babu, V.R. (2016). Cold rolling mill for aluminium sheet. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(2), 257728.

37.Hirsch, J. (2011). Aluminium sheet fabrication and processing. In fundamentals of aluminium metallurgy (pp. 719-746). Woodhead Publishing. DOI: 10.1533/9780857090256.3.719.

38.Hirsch, Yu., Grechnikova, A.F., Aryshensky, E.V. & Drits, A.M. (2018). Features of the evolution of microstructure and crystallographic texture in the manufacture of aluminum tapes for the production of food containers. Part 2. *Non-ferrous metals*, (11), 62-69. (In Russ.). DOI: 10.17580/tsm.2018.11.09.

39.Aryshenskii, E., Lapshov, M., Konovalov, S., Hirsch, J., Aryshenskii, V. & Sbitneva, S. (2021). The casting rate impact on the microstructure in Al-Mg-Si alloy with silicon excess and small Zr, Sc additives. *Metals*, 11(12), 2056. DOI: 10.3390/met11122056.

40.Aryshenskii, E., Lapshov, M., Hirsch, J., Konovalov, S., Bazhenov, V., Drits, A. & Zaitsev, D. (2021). Influence of the small Sc and Zr additions on the as-cast microstructure of Al-Mg-Si alloys with excess silicon. *Metals*, 11(11), 1797. DOI: 10.3390/met11111797.

41.Aryshenskii, E., Lapshov, M., Konovalov, S., Hirsch, J., Aryshenskii, V. & Sbitneva, S. (2021). The casting rate impact on the microstructure in Al-Mg-Si alloy with silicon excess and small Zr, Sc additives. *Metals*, 11(12), 2056. DOI: 10.3390/met11122056.

42.Belov, N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Cherkasov, S. & Avxentieva, N. (2023). Effect of Fe-

Bearing Phases on the Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Al-2wt.% Cu-1.5 wt.% Mn (Mg, Zn) Non-Heat Treatable Sheet Alloy. *Metals*, 13(11), 1911. DOI: 10.3390/met13111911.

43.Belov, N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Letyagin, N. & Fortuna, A. (2023). Structure evolution and mechanical properties of sheet Al-2Cu-1.5 Mn-1Mg-1Zn (wt.%) alloy designed for Al₂₀Cu₂Mn₃ dispersoids. *Metals*, 13(8), 1442. DOI: 10.3390/met13081442.

Информация об авторах

А. А. Левагина – младший научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ.

Е. В. Арышенский – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Управления научных исследований, проректор по научной и инновационной деятельности СибГИУ.

А. М. Дриц – кандидат технических наук, директор по развитию бизнеса и новых технологий АО "СМЗ".

М. С. Тептерев - кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОНИЛ № 4 Самарского университета.

Information about the authors

A.A. Levagina - Junior Researcher of the SibGIU Research Department.

E.V. Aryshensky - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the SibGIU Research Department.

S.V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Research Department, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities of SibGIU.

A.M. Drits - Candidate of Technical Sciences, Director of Business Development and New Technologies of JSC "SMZ".

M.S. Tepterevev - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at ONIL No. 4 of Samara University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.