

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ФОЛЬГИ ИЗ СПЛАВА АЛТЭК ДЛЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

© 2025

- А. А. Левагина** младший научный сотрудник в управлении научных исследований;  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк;  
[levagina\\_aa@sibsiu.ru](mailto:levagina_aa@sibsiu.ru)
- Е. В. Арышенский** доктор технических наук, PhD, главный научный сотрудник в управлении научных исследований;  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк;  
[arishenskiy\\_ev@sibsiu.ru](mailto:arishenskiy_ev@sibsiu.ru)
- С. В. Коновалов** доктор технических наук, главный научный сотрудник в управлении научных исследований, проректор по научной и инновационной деятельности;  
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк;  
[konovалov@sibsiu.ru](mailto:konovалov@sibsiu.ru)
- Н. О. Короткова** кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Гибридные наноструктурные материалы»;  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва; [kruglova.natalie@gmail.com](mailto:kruglova.natalie@gmail.com)
- М. С. Тептерев** кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОНИЛ-4;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [tepterev.ms@ssau.ru](mailto:tepterev.ms@ssau.ru)
- С. А. Борминский** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [borminskiy.sa@ssau.ru](mailto:borminskiy.sa@ssau.ru)

Исследовано формирование физико-механических свойств алюминиевого сплава АЛТЭК (аббр.: алюминевый, теплопрочный, экономный), принадлежащего системе Al-Cu-Mn с концентрацией меди 2% и марганца 2% при отжиге. Для этого из исследуемого сплава с помощью горячей, а потом и холодной прокатки получали фольгу толщиной 0,2 мм, которая затем подвергалась отжигу при температуре 300...500 °С. После этого исследовалась электропроводность и механические свойства фольги. Исследования показали, что сплав 2Cu2Mn сохраняет высокие механические характеристики при воздействии температур 300...400 °С благодаря термостойким частицам  $Al_{20}Cu_2Mn_3$ , выделяющимся в процессе горячей прокатки. Электропроводность при отжиге также значительно повышается. Наилучшие результаты достигаются при режиме отжига 400 °С, 3 часа:  $\sigma_g = 288,7$  МПа при максимальном значении электропроводности 29,6 МСм/м.

*Алюминевые сплавы; электротехника; трансформаторы; фольга; механические свойства; электропроводность; АЛТЭК*

**Цитирование:** Левагина А.А., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Короткова Н.О., Тептерев М.С., Борминский С.А. Механические и электрические свойства электротехнической фольги из сплава АЛТЭК для обмоток трансформатора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 1. С. 143-152. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-143-152

### Введение

В 2024 году наблюдался рост потребления электроэнергии<sup>1</sup>, что увеличивает нагрузку на системы распределения и требует повышения эффективности трансформаторов. Длительное воздействие электрического тока и высоких температур снижает проводимость проводников [1], что приводит к дополнительным тепловым потерям и

<sup>1</sup> Николай Шульгинов: «В прошедшем осенне-зимнем сезоне электропотребление выросло на 3,5%». <https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-v-proshedshe-osenne-zimnem-sezone-elektropotreblenie-vyroslo-na-3-5->

уменьшению коэффициента полезного действия. Проводниковый материал трансформатора представлен витками проводов или фольгой, насаженными на стержни сердечника.

В качестве исходного материала используется медная (М1, М2) или алюминиевая фольга (алюминий с гарантированными электрическими свойствами типа АЕ; алюминий технической чистоты: А5, А7 и иностранные марки 1050,1350) толщиной 0,02...0,2 мм. Также используется лента 0,22...2,0 мм с высокой проводимостью [2 – 4]. К материалу выдвигается несколько технических требований: удельное электрическое сопротивление не более 0,01784 Ом·м для медного проводника и не более 0,029 Ом·м для алюминиевого, а также достаточная прочность, чтобы выдерживать механические силы, возникающие в результате взаимодействия тока с магнитным полем [2].

Согласно прогнозам<sup>2</sup>, к 2025 году цены на медь могут вырасти более чем на 75%, что требует поиска новых материалов для электротехнической промышленности. Чистый алюминий и его сплавы являются более дешевыми альтернативами меди, однако они имеют более высокое удельное сопротивление и худшие механические свойства. Разработка новых легированных алюминиевых сплавов может обеспечить необходимые характеристики, сохраняя при этом электрические свойства чистого алюминия.

Одними из таких материалов являются разработанные профессором Беловым Н.А. [5 – 13] сплавы Al-Cu-Mn с содержанием меди до 3% (сплавы АЛТЭК, аббр.: алюминиевый, теплопрочный, экономный), обладающие повышенной прочностью, термостойкостью и удовлетворительной электропроводностью без необходимости проведения закалки и гомогенизации. Предполагается, что уникальный набор свойств позволит использовать данные сплавы в электротехнической промышленности для производства проводов для воздушных линий передач и проводящей фольги (ленты) для обмотки трансформаторов.

Литые образцы из сплавов АЛТЭК имеют двухфазную равновесную структуру [11], что объясняет отсутствие операции гомогенизационного отжига в технологии изготовления. Кроме того, сплавы АЛТЭК демонстрируют высокую обрабатываемость при прокатке, не требуя предварительной обработки, что делает их пригодными для процессов холодной прокатки со значительными показателями обжатия [5]. После отжига при 400 °С эти сплавы образуют мелкодисперсные частицы  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  размером 100...500 нм, затрудняющие процессы полигонизации и рекристаллизации.

Проводимые исследования направлены на изучение фазового состава (в литом состоянии и после заключительных отжигов), а также влияния концентрации меди, марганца и температур отжига на механические свойства (в частности, твёрдость) и электропроводность. Большинство исследований посвящено изучению свойств холоднокатаных листов толщиной 0,5 мм и 2 мм. Есть также работы, в которых приведены свойства прутков диаметром 9 мм и проволок диаметрами 0,5 мм и 1 мм [8; 11]. В то же время отсутствуют исследования, посвященные формированию физико-механических свойств при производстве фольги из сплавов АЛТЭК. Данная работа посвящена решению этого вопроса.

### Методика эксперимента

Для исследования сплава, химический состав которого представлен в табл. 1, в стальной кокиль размером 40×120×450 мм со скоростью охлаждения 2 °С/с был отлит слиток системы АЛТЭК. Для приготовления расплава использовался алюминий марки А85Si, медь М1, таблетки Mn90. Для плавки использовалась печь марки Xtoki. После

<sup>2</sup> Lee Y.Sh. Copper could skyrocket over 75% to record highs by 2025 – brace for deficits, analysts say.  
<https://www.cnbc.com/2024/01/03/copper-appears-set-to-rally-more-than-75percent-by-2025-analysts-say.html>

этого слиток был подвергнут механической обработке и деформации на прокатном стане DIMA 300 в диапазоне температур горячей прокатки от 380 до 420°C, в результате чего его толщина уменьшилась до 2 мм, что соответствует обжатию 93%. Холодная прокатка проводилась на том же стане до толщины 1 мм (обжатие 50%) и далее до 0,2 мм (обжатие 50%). Промежуточный отжиг выполнялся в муфельной печи THERM CONCEPT KM 70/06/A при температуре 350°C в течение 30 минут.

Таблица 1. Химический состав модельного сплава

Концентрации легирующих элементов, %				
Cu	Mn	Fe	Si	Al
2,01	2,06	0,07	0,04	95,82

Для измерения удельной электрической проводимости фольги толщиной 0,2 мм в зависимости от температуры отжига использовался мультиметр МУ68, подключенный к источнику питания MAISHENG MS3010D-MS002 (30 В, 10 А). Показания напряжения источника постоянного тока  $U$  ( $I = 10$  А, погрешность измерения  $\pm 0,7\%$ ) фиксировались, затем определялись сопротивление материала  $r$ , Ом и электропроводность  $\sigma_3$  МСм/м по формулам:

$$r = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

$$\sigma_3 = \frac{x}{rA}, \quad (2)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;  $x$  – расстояние между клеммами, м.

Для определения механических свойств при комнатной температуре методом одноосного растяжения в соответствии с ISO 6892-1 использовалась универсальная испытательная машина Zwick / Roell Z050. Расчёты предела текучести, предела прочности и относительного удлинения выполнялись на основании результатов испытаний согласно ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 11150-84.

В ходе исследования была проанализирована зёрнистая структура и микроструктура сплавов, включая её состав, размеры и формы, в процессе деформационной обработки. Для наблюдения зёрнистой структуры образцов использовался оптический микроскоп Axiovert-40 MAT компании Carl Zeiss (Германия). Для определения химического состава интерметаллидных фаз применялся энергодисперсный спектрометр (EDS) от OXFORD INSTRUMENTS с точностью измерений до 0,01%.

### Результаты и обсуждение

Было определено, что в холоднокатаном состоянии значение электропроводности наименьшее и равно 14,6 МСм/м, поскольку легирующие элементы еще растворены в твёрдом растворе (рис. 1).

Повышение электропроводности, обусловленное распадом твёрдого раствора и снижением плотности дефектов [7], фиксируется в температурном диапазоне от 300 до 400°C, при этом достигается пик значений 29,6 МСм/м. В дальнейшем наблюдается снижение этой характеристики до 24,4 МСм/м, что может быть связано с процессом растворения Al<sub>2</sub>Cu [7] (рис. 1).

На рис. 2 приведены полученные результаты изменения механических свойств в процессе отжига.

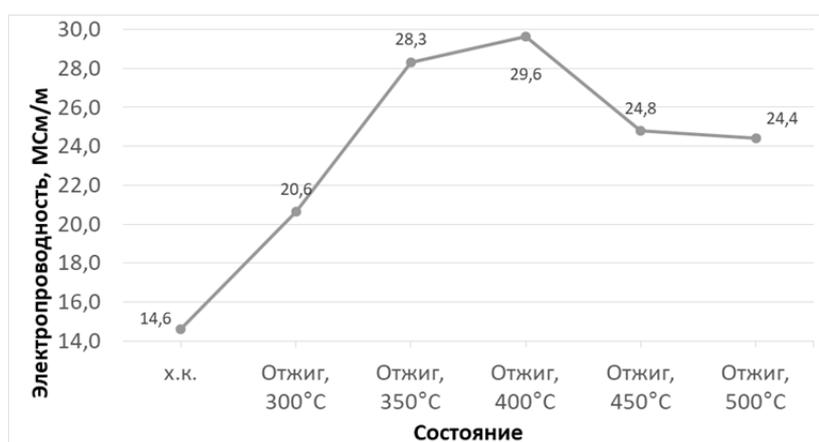


Рис. 1. Изменение электропроводности в зависимости от температуры отжига

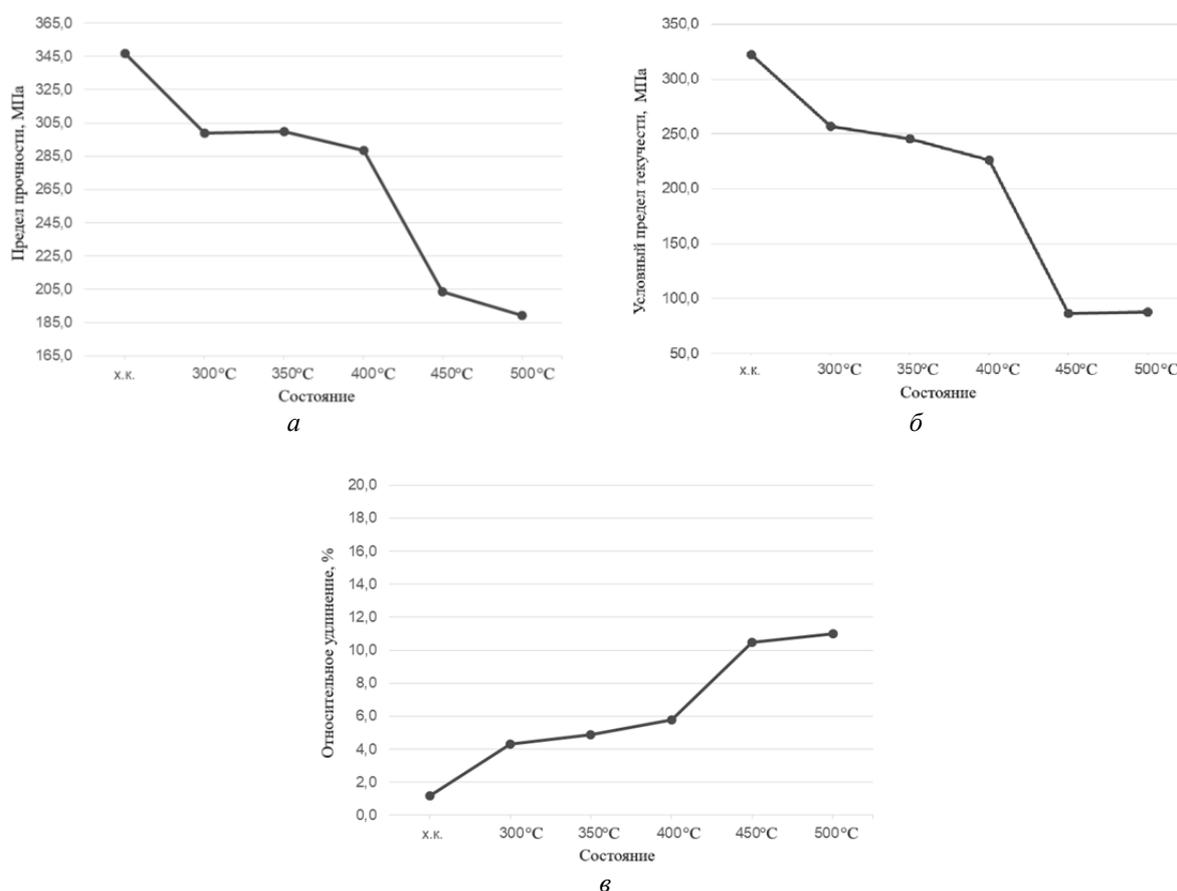


Рис. 2. Изменение механических свойств прокатанных листов толщиной 0,2 мм в зависимости от температуры отжига:

а – предел прочности, МПа; б – условный предел текучести, МПа; в – относительное удлинение, %

Предел прочности фольги в холоднокатаном состоянии составляет 346,7 МПа. На рис. 2 видно, что предел прочности при отжиге 300°C снижается на 47,7 МПа по сравнению с холоднокатанным состоянием. При дальнейшем повышении температуры отжига до 400°C прочность снижается незначительно, а именно на 11,3 МПа. При температурах отжига 400...500°C предел прочности снижается до 189 МПа.

Условный предел текучести имеет схожую зависимость: в холоднокатаном состоянии он имеет значение 322 МПа, снижаясь на 65 МПа после воздействия отжига 300°C, что также связано с уменьшением плотности дислокаций и устранением остаточных напряжений. В диапазоне температур отжига 300...400°C наблюдается относительная стабильность характеристики: уменьшение составило 12%. При температурах отжига 400...450°C величина снижается до 86 МПа. Далее условный предел текучести незначительно повышается на 1,3 МПа. Относительное удлинение имеет обратную зависимость, увеличиваясь на всех этапах обработки с 1,17% до 11%. Микроструктура образцов первой плавки после отжигов представлена на рис. 3.

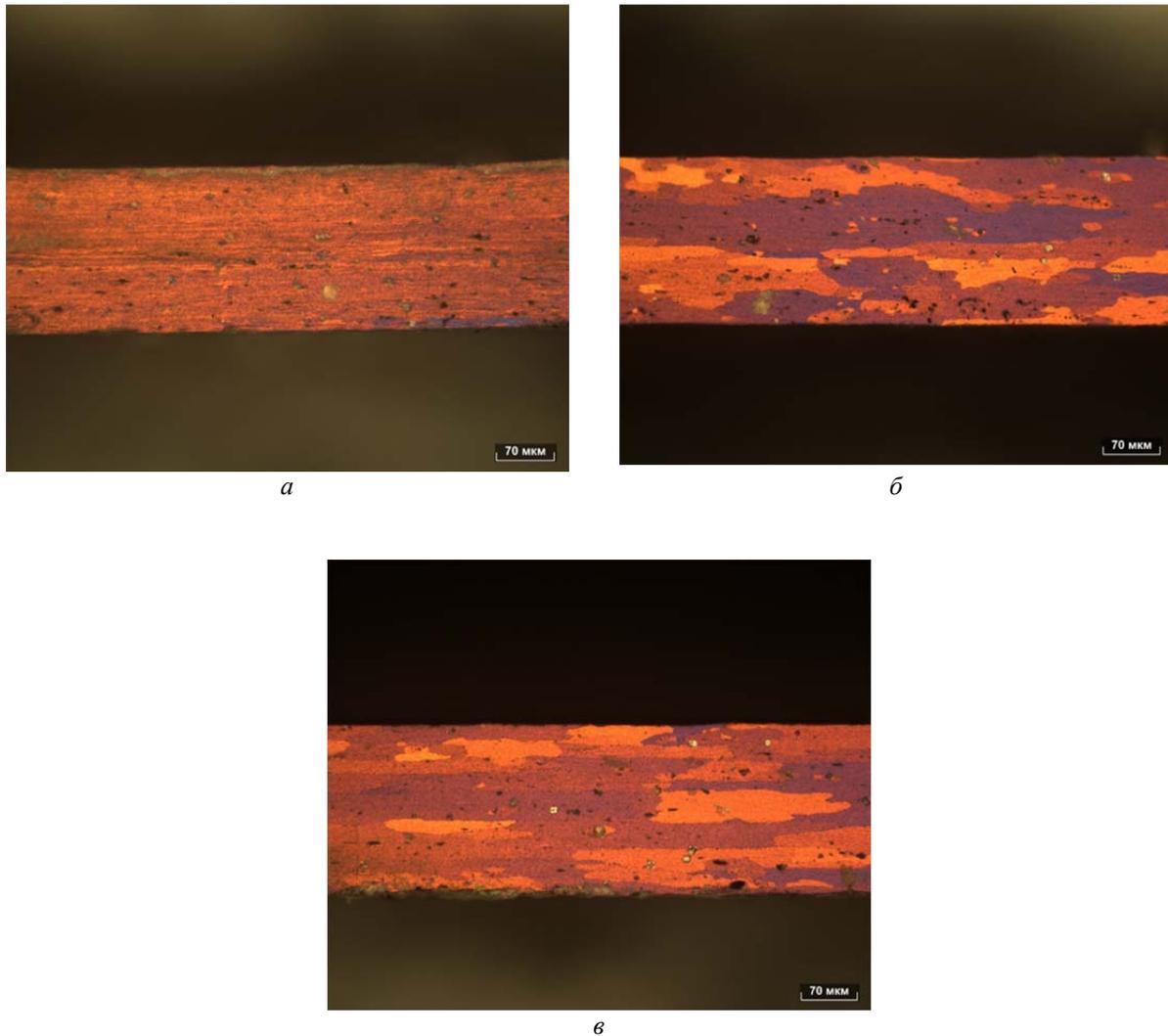


Рис. 3. Микроструктура образцов первой плавки после отжигов (3 часа):  
а – 400°C; б – 450°C; в – 500°C

При температурах до 400°C зёрненная структура образцов не рекристаллизованная, деформированная, вытянутая в направлении прокатки. При температуре отжига 450°C происходит рекристаллизация, при этом средний размер образовавшихся в ходе неё зёрен составляет около 220,3 мкм. Средний размер зерен при температуре отжига 500°C уменьшается и составляет около 185 мкм.

Необходимо отметить, что механические свойства исследуемой фольги во многом определяются процессами, происходящими с интерметаллидными частицами. В про-

цессе горячей прокатки, которая предшествует холодной, образуются термостабильные частицы  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  [9], при дальнейших отжигах при 300...350°C растворяются крупные интерметаллиды  $Al_2Cu$ . После холодной деформации лента нагартовывается и повышает свои механические свойства за счёт деформационного упрочнения. В процессе нагрева частицы  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  предотвращают процессы рекристаллизации и полигонизации до режимов отжига 400°C, что подтверждается результатами оптической микроскопии. Кроме того, при данных температурах происходит рост электропроводности, что также связано с выделением марганецсодержащих частиц из пересыщенного твердого раствора.

Однако при температуре 400°C вторичные выделения фазы  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  начинают коагулировать и больше не могут сдерживать процессы полигонизации и рекристаллизации, поэтому наблюдается снижение прочностных свойств фольги. Электропроводность также падает, что может быть связано с растворением интерметаллидов типа  $Al_2Cu$ .

Согласно имеющимся данным [7; 10], сплавы АЛТЭК с содержанием меди 2% и марганца 1,5...2% сохраняют прочность при режимах отжига от 300...350°C, 3 часа. При температуре отжига 400°C предел прочности незначительно снижается, что согласуется с данными, полученными в настоящей работе.

В работе [6] исследуется аналогичный состав сплава 2Cu2Mn, обработанный только холодной прокаткой до толщины 0,5 мм. Так, в холоднокатаном состоянии предел прочности составляет 371 МПа, после отжига при температуре 400°C в течение трёх часов 277 МПа. В [13] образец состава 2Cu1,5Mn обрабатывали как горячей прокаткой, так и холодной. При этом предел прочности в тех же состояниях – 345 и 304 МПа. Уменьшение предела прочности после отжига 400°C по сравнению с холоднокатаным состоянием для составов 2Cu2Mn и 2Cu1,5Mn, исследованных в работах [6] и [13], составило 25,3% и 11,9% соответственно. В то время для сплава, изучаемого в данной работе, 16,8%.

Удельная электропроводность сплавов, содержащих 2% Mn и от 0 до 3% Cu, в исследовании [7] начинает повышаться при 300°C, достигая максимума при режиме отжига 400°C в 28,6 МСм/м, снижаясь при 500°C. В данной работе график изменения электропроводности имеет схожую зависимость, при этом максимальное значение составило 29,6 МСм/м. В [6] идентичный холоднообработанный состав достигает максимума электропроводности при температуре отжига 400°C в 27 МСм/м. Другая перспективная вариация базового сплава АЛТЭК 1,5Cu1,5Mn [10] демонстрирует значительное увеличение электропроводности до 28 МСм/м при отжиге 450°C. Более высокие значения электропроводности изготовленного сплава можно объяснить более высокой степенью его нагартованности по сравнению с образцами в других исследованиях [6; 7; 10]: в данном случае деформация без промежуточных отжигов происходила в диапазоне толщин 0,2...2,0 мм, в то время как в других исследованиях – в диапазоне 2,0...10,0 мм. Более нагартованное изделие характеризуется большим количеством дислокаций, а значит большим количеством участков для образования интерметаллидных частиц.

### **Заключение**

Таким образом, разработан термостойкий сплав системы АЛТЭК, не требующий гомогенизации. По сравнению со сплавами, применяемыми в электротехнике, новый сплав обладает меньшей электропроводностью. Так, электротехническая фольга А0 имеет электропроводность не менее 34,5 МСм/м, что больше УЭП изучаемого сплава

на 4,9 МСм/м. Однако прочностные характеристики промышленных сплавов гораздо ниже, в диапазоне 40...95 МПа, что в 7,2...3,2 раз меньше прочности сплава АЛТЭК (отжиг 400°C, 3 ч).

В холоднокатаном состоянии электропроводность фольги имеет минимальное значение 14,6 МСм/м. В процессе термической обработки электропроводность увеличилась до 29,6 МСм/м. Предел прочности сплава в холоднокатаном состоянии составил 346,7 МПа и снизился при отжиге 300°C до 299 МПа. При этом значения предела прочности оставались стабильными в диапазоне отжигов 300...400°C, что свидетельствует о термостабильности данного состава. При температуре отжига 450°C произошла рекристаллизация, что привело к снижению прочностных характеристик и электропроводности. Основой высоких прочностных свойств являются мелкодисперсные частицы типа  $Al_{20}Cu_2Mn_3$ , сформировавшиеся при горячей прокатке, которые подавляют процессы полигонизации и рекристаллизации. При отжиге после холодной прокатки происходит дальнейшее формирование частиц типа  $Al_{20}Cu_2Mn_3$ , что сопровождается повышением электропроводности данного сплава.

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

### Библиографический список

1. Протацкая А.А., Вагапов А.Р., Искандаров Р.О. Сравнение сухих и масляных трансформаторов // Наука среди нас. 2018. № 1 (5). С. 114-118.
2. Герасимова Л.С., Дейнега И.А., Пшеничный Г.И., Чечелюк Я.З. Технология и механизация производства обмоток и изоляции силовых трансформаторов. М.: Энергия, 1979. 336 с.
3. ГОСТ 13726-97. Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2005. 23 с.
4. ГОСТ 618-2014. Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 15 с.
5. Короткова Н.О., Шуркин П.К., Черкасов С.О., Аксенов А.А., Финогеев А.С. Влияние концентрации меди и температуры отжига на структуру и механические свойства слитков и холоднокатаных листов сплава Al-2%Mn // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2022. Т. 28, № 1. С. 67-78. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-1-67-78
6. Belov N.A., Akopyan T.K., Shurkin P.K., Korotkova N.O. Comparative analysis of structure evolution and thermal stability of commercial AA2219 and model Al-2 wt% Mn-2 wt% Cu cold rolled alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2021. V. 864. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.158823
7. Белов Н.А., Короткова Н.О., Шуркин П.К., Аксенов А.А. Обоснование концентрации меди в термостойких деформируемых алюминиевых сплавах, содержащих 2 мас. % Mn // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 12. С. 1315-1323. DOI: 10.31857/S0015323020120037
8. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Pesin A.M. 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. 2019. V. 782. P. 735-746. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.240
9. Belov N., Akopyan T., Tsydenov K., Cherkasov S., Avxentieva N. 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*. 2023. V. 13, Iss. 11. DOI: 10.3390/met13111911

10. Belov N., Korotkova N., Akopyan T., Tsydenov K. 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*. 2019. V. 9, Iss. 12. DOI: 10.3390/met9121246

11. Белов Н.А. Обоснование состава и структуры деформируемых сплавов на базе системы Al-Cu-Mn (Zr), не требующих гомогенизации и закалки // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении» (24-26 мая 2022 г., Москва). М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 10-13.

12. Belov N.A., Akopyan T.K., Korotkova N.O., Timofeev V.N., Shurkin P.K. Effect of cold rolling and annealing temperature on structure, hardness and electrical conductivity of rapidly solidified alloy of Al-Cu-Mn-Zr system // *Materials Letters*. 2021. V. 300. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130199

13. Belov N., Akopyan T., Tsydenov K., Letyagin N., Fortuna A. Structure evolution and mechanical properties of sheet Al-2Cu-1.5 Mn-1Mg-1Zn (wt.%) alloy designed for Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> disperoids // *Metals*. 2023. V. 13, Iss. 8. DOI: 10.3390/met13081442

## MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ALTEK ALLOY ELECTRICAL FOIL FOR TRANSFORMER WINDINGS

© 2025

- A. A. Levagina** Junior Researcher;  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation;  
[levagina\\_aa@sibsiu.ru](mailto:levagina_aa@sibsiu.ru)
- E. V. Aryshenskii** Doctor of Science (Engineering), PhD, Chief Researcher, Research Department;  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation;  
[arishenskiy\\_ev@sibsiu.ru](mailto:arishenskiy_ev@sibsiu.ru)
- S. V. Konovalov** Doctor of Science (Engineering), Chief Scientific Officer of the Research  
Department; Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities;  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation;  
[konovalov@sibsiu.ru](mailto:konovalov@sibsiu.ru)
- N. O. Korotkova** Candidate of Science (Engineering), Junior Researcher, Laboratory of Hybrid  
Nano-structured Materials;  
MISIS National Research Technological University, Moscow, Russian Federation;  
[kruglova.natalie@gmail.com](mailto:kruglova.natalie@gmail.com)
- M. S. Tepterev** Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, ONIL-4;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[tepterev.ms@ssau.ru](mailto:tepterev.ms@ssau.ru)
- S. A. Borminsky** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor  
of the Department of Electrical Engineering;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[borminskiy.sa@ssau.ru](mailto:borminskiy.sa@ssau.ru)

The formation of physical and mechanical properties of the aluminum alloy ALTEK (aluminum, heat-resistant, economical, abbreviated: ALTEK), belonging to the Al-Cu-Mn system with a copper concentration of 2% and manganese of 2% during annealing was studied. For this purpose, a 0.2 mm thick foil was obtained from the studied alloy using hot and then cold rolling, which was then annealed at a temperature of 300...500°C. After that, the electrical conductivity and mechanical properties of the foil were studied. The studies showed that the 2Cu2Mn alloy retains high mechanical characteristics when exposed to temperatures of 300...400°C due to heat-resistant particles of Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> released during hot rolling. Electrical conductivity during annealing also increases significantly. The best

results are achieved with the annealing mode of 400°C, 3 h:  $\sigma_{\text{н}} = 288.7$  MPa with a maximum electrical conductivity value of 29.6 MSm/m.

*Aluminum alloys; electrical engineering; transformers; foil; mechanical properties; electrical conductivity; ALTEK*

*Citation:* Levagina A.A., Aryshenskii E.V., Konovalov S.V., Korotkova N.O., Tepterev M.S., Borminsky S.A. Mechanical and electrical properties of ALTEK alloy electrical foil for transformer windings. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 1. P. 143-152. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-143-152

## References

1. Protatskaya A.A., Vagapov A.R., Iskandarov R.O. Comparison of dry and oil transformers. *Nauka Sredi Nas*. 2018. No. 1 (5). P. 114-118. (In Russ.)
2. Gerasimova L.S., Deynaga I.A., Pshenichnyy G.I., Chechelyuk Ya.Z. *Tekhnologiya i mekhanizatsiya proizvodstva obmotok i izolyatsii silovykh transformatorov* [Technology and mechanization of production of windings and insulation of power transformers]. Moscow: Energiya Publ., 1979. 336 p.
3. GOST 13726-97. Aluminium and aluminium alloys strips. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 23 p. (In Russ.)
4. GOST 618-2014. Aluminium foil for technical purposes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 15 p. (In Russ.)
5. Korotkova N.O., Shurkin P.K., Cherkasov S.O., Aksenov A.A. Effect of copper concentration and annealing temperature on the structure and mechanical properties of ingots and cold-rolled sheets of Al-2% Mn alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2022. V. 63, Iss. 2. P. 190-200. DOI: 10.3103/S1067821222020080
6. Belov N.A., Akopyan T.K., Shurkin P.K., Korotkova N.O. Comparative analysis of structure evolution and thermal stability of commercial AA2219 and model Al-2 wt% Mn-2 wt% Cu cold rolled alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 864. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.158823
7. Belov N.A., Korotkova N.O., Shurkin P.K., Aksenov A.A. Substantiation of the copper concentration in thermally stable wrought aluminum alloys containing 2 WT % of Mn. *Physics of Metals and Metallography*. 2020. V. 121, Iss. 12. P. 1211-1219. DOI: 10.1134/S0031918X20120030
8. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Pesin A.M. 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*. 2019. V. 782. P. 735-746. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.240
9. Belov N., Akopyan T., Tsydenov K., Cherkasov S., Avxentieva N. Effect of Fe-bearing phases on the mechanical properties and fracture mechanism of Al-2wt.% Cu-1.5wt.% Mn (Mg, Zn) non-heat treatable sheet alloy. *Metals*. 2023. V. 13, Iss. 11. DOI: 10.3390/met13111911
10. Belov N., Korotkova, N., Akopyan, T., Tsydenov, K. 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*. 2019. V. 9, Iss. 12. DOI: 10.3390/met9121246
11. Belov N.A. Substantiation of the composition and structure of deformable alloys based on the Al-Cu-Mn (Zr) system that do not require homogenization and quenching. *Proceedings of the International Conference «MashTech 2022. Innovative Technologies, Equipment and Materials for Blanking Productions in Mechanical Engineering» (May, 24-26, 2022, Moscow)*. Moscow: BMSTU Publ., 2022. P. 10-13. (In Russ.)
12. Belov N.A., Akopyan T.K., Korotkova N.O., Timofeev V.N., Shurkin P.K. Effect of cold rolling and annealing temperature on structure, hardness and electrical conductivity of

rapidly solidified alloy of Al-Cu-Mn-Zr system. *Materials Letters*. 2021. V. 300. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130199

13. Belov N., Akopyan T., Tsydenov K., Letyagin N., Fortuna A. Structure evolution and mechanical properties of sheet Al-2Cu-1.5 Mn-1Mg-1Zn (wt.%) alloy designed for Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> disperoids. *Metals*. 2023. V. 13, Iss. 8. DOI: 10.3390/met13081442