

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.791.13; 620.22

doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-69-78

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ПЕРЕХОДНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ БИМЕТАЛЛА
МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ**

Дмитрий Борисович Крюков✉

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
ddbkk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

Аннотация

В работе представлены результаты комплексного исследования влияния режимов термической обработки на величину переходного электросопротивления и структурные изменения в биметаллических образцах медь-алюминий, полученных сваркой взрывом. Основной целью исследования является установление оптимального режима термической обработки биметалла медь-алюминий, полученного сваркой взрывом, для достижения минимального переходного электрического сопротивления за счет баланса между снятием наклёпа и подавлением роста интерметаллических фаз. Задача, решению которой посвящена статья, заключается в установлении количественных зависимостей переходного электросопротивления биметалла медь-алюминий от параметров термической обработки и исследование корреляции между величиной сопротивления и структурными изменениями в переходной зоне. В качестве методов исследования применялся сравнительный анализ на этапе определения актуальности работы, прецизионная микрометрия, оценка микроструктуры материала, методы количественной оценки зависимости переходного сопротивления композита от температуры

и времени отжига. Новизна работы заключается в установлении оптимального режима термической обработки, обеспечивающего минимальное переходное сопротивление биметалла медь-алюминий, полученного сваркой взрывом по сравнению с биметаллом, изготовленным по традиционным технологиям. Результаты исследования показали, что величина сопротивления определяется конкуренцией двух процессов: снятия наклёпа, приводящего к снижению сопротивления, и роста интерметаллических фаз, вызывающих его увеличение. Выявлен оптимальный режим термической обработки (нагрев до 350 °С с выдержкой в печи в течение 45 мин), обеспечивающий минимальное переходное сопротивление 1,12 мкОм. Сравнительное исследование с промышленными аналогами композита медь-алюминий показало, что переходное сопротивление разработанного биметалла в 2...2,5 раза ниже, чем у обмоток трансформаторов, изготовленных по традиционным технологиям.

Ключевые слова: биметалл медь-алюминий, электросопротивление, термическая обработка, интерметаллиды, сварка, прокатка, микрометрия, структура, соединение.

Ссылка для цитирования:

Крюков Д.Б. Влияние режимов термической обработки на переходное электросопротивление биметалла медь-алюминий, полученного сваркой взрывом / Д.Б. Крюков // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 1. – С. 69-78. doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-69-78.

Original article

Open Access Article

**INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES ON THE TRANSIENT
ELECTRICAL RESISTANCE OF COPPER-ALUMINUM BIMETAL
OBTAINED BY EXPLOSION WELDING**

Dmitry Borisovich Kryukov✉

Penza State University, Penza, Russia
ddbkk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

© Крюков Д. Б., 2026

Abstract

The paper presents the results of a comprehensive study of the effect of heat treatment modes on the value of transient electrical resistance and structural changes in bimetallic copper-aluminum samples obtained by explosion welding. The main objective of the study is to find out the optimal mode of heat treatment of copper-aluminum bimetal obtained by explosion welding in order to achieve a minimum transient electrical resistance due to the balance between de-riveting and suppressing the growth of the intermetallic phases. The task to which the paper is devoted is to establish quantitative dependences of the transient electrical resistance of copper-aluminum bimetal on the parameters of heat treatment and to study the correlation between the resistance value and structural changes in the transition zone. The research methods used include comparative analysis at the stage of determining the relevance of the work, precision micrometry, evaluation of the microstructure of the material, methods for quantifying the dependence of the transient resistance of the composite on temperature and annealing time. The novelty of the work

is in finding an optimal heat treatment mode that ensures the minimum transient resistance of copper-aluminum bimetal obtained by explosion welding compared with bimetal manufactured using traditional technologies. The results of the study show that the amount of resistance is determined by the competition of two processes: deriveting, which leads to a decrease in resistance, and the growth of intermetallic phases, which cause its increase. The optimal mode of heat treatment (heating to 350 °C with exposure in the furnace for 45 minutes), providing a minimum transient resistance of 1.12 microhm, is identified. A comparative study with industrial analogues of the copper-aluminum composite show that the transient resistance of the developed bimetal is 2-2.5 times lower than that of transformer windings manufactured using traditional technologies.

Keywords: copper-aluminum bimetal, electrical resistance, heat treatment, intermetallic semiconductors, welding, rolling, micrometry, structure, compound.

Reference for citing:

Kryukov DB. Influence of heat treatment modes on the transient electrical resistance of copper-aluminum bimetal obtained by explosion welding. *Transport Engineering*. 2026;1:69-78. doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-69-78.

Введение

Биметаллические системы медь-алюминий нашли широкое применение в электротехнической промышленности благодаря удачному сочетанию высокой электропроводности и коррозионной стойкости меди с малым удельным весом и низкой стоимостью алюминия [1, 2]. Основная область их применения – производство критически важных элементов электрооборудования: токоведущих шин, контактов силовых выключателей, обмоток трансформаторов и других компонентов, где требуется эффективное и надежное соединение разнородных металлов [3, 4]. Номенклатура различных видов элементов оснастки электрооборудования на основе биметалла медь-алюминий приведена на рис. 1.

Традиционными технологиями получения композиционного биметалла медь-алюминий являются пакетная сварка прокаткой, холодная сварка, литое плакирование и ряд других. Однако всем им характерен один существенный недостаток, а именно низкое качество сварного шва, за счет образования в нем окислов на соединяемых поверхностях металлов в тех-

нологическом цикле сварки, и как следствие, более высокое переходное электрическое сопротивление контакта. Высокое и нестабильное переходное сопротивление приводит к локальному джоулеву нагреву, повышенным энергопотерям, термическим напряжениям, что в свою очередь приводит к снижению надежности и долговечности электротехнических устройств [5]. В особых случаях это может провоцировать аварийные ситуации.

Одним из наиболее эффективных методов получения качественного соединения меди и алюминия, лишенного, указанных выше недостатков, является сварка взрывом [6, 7]. Данная технология позволяет создавать металлические связи на межатомном уровне за счет высокоскоростного соударения, обеспечивая высокую прочность сварного шва. Однако как сам технологический процесс сварки взрывом, так и последующие технологические операции, такие как холодная прокатка для калибровки толщины и улучшения качества поверхности, вносят в структуру соединения значительные пластические деформации (наклёп).

Наклёп увеличивает плотность дислокаций и других дефектов кристаллической решетки, что закономерно приводит

к росту удельного электрического сопротивления материала в переходной зоне [8].



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Элементы оснастки электрооборудования на основе биметалла медь-алюминий где : а – биметаллический переходный зажим, б – шина токоввода, в – композиционный (3-х слойный) медно-алюминиевый переходник, г – биметаллические наконечники кабелей, д – биметаллические шайбы, е – композиционный токоввод трансформатора

Fig. 1. Components of electrical equipment based on bimetal copper-aluminum where: a - bimetallic transition clamp, b - busbar, c - composite (3-layer) copper-aluminum adapter, d - bimetallic cable tips, d - bimetallic washers, e - compound current lead of the transformer

Для управления структурой и свойствами биметалла, в частности для снятия остаточных напряжений, полученный материал часто подвергают термической обработке (ТО). Однако в системе медь-алюминий нагрев активизирует процессы диффузии, что приводит к образованию интерметаллических фаз (таких как CuAl_2 , Cu_9Al_4 и др.) [3, 9, 10]. Эти фазы, как правило, хрупки и обладают высоким удельным электрическим сопротивлением, что может нивелировать положительный эффект от снятия наклёпа и существенно ухудшать эксплуатационные характеристики соединения. Таким образом, суще-

Материалы и методы

В качестве исходных материалов для сварки композита использовали медь марки М1 и алюминий марки АД1 (ГОСТ 859-78, ГОСТ 4784-74). Данные материалы, обладают высокой проводимостью и находят применение в электротехнической отрасли, приборостроении при изготовлении шин тоководов, кабельных наконечников, различного рода токоведущих частей и т.п. Биметаллические заготовки были получены методом сварки взрывом на оптимальном режиме, обеспечивающем формирование высокопрочного соединения с минимальной дефектностью, с отсутствием в зоне сварного шва участков расплава металла.

Для исследований использовались образцы двух типов, вырезанные из полученных заготовок: Тип А (после сварки): образцы размером $15 \times 15 \times 3,0$ мм, вырезанные непосредственно после сварки взрывом; Тип Б (после сварки и прокатки): образцы размером $15 \times 15 \times 2,45$ мм, вырезанные из заготовки, подвергнутой холодной прокатке после сварки.

Перед проведением измерений одну из граней образца, предназначенную для контакта с измерительными щупами, тщательно подготавливали. Последовательная механическая шлифовка и последующее полирование позволяли достичь шероховатости поверхности R_z не более 0,01 мм, что являлось критически важным для обеспечения стабильного и низкоомного контакта.

ствует технологическое противоречие: с одной стороны, термическая обработка необходима для снятия наклёпа после сварки взрывом и последующего технологического передела композита, с другой – она может провоцировать в нем рост интерметаллидов. Вопросу исследования структуры и механических свойств медно-алюминиевого биметалла посвящен ряд работ [6, 7, 11-14], однако систематическое изучение влияния режимов термической обработки на электрофизические характеристики, особенно кинетики их изменения, представлено в литературе недостаточно полно.

Образцы типа Б подвергались термической обработке в лабораторной камерной печи сопротивления в атмосфере воздуха. Для изучения кинетики процессов были выбраны четыре температурных режима: 350, 400, 450 и 500 °С. Время выдержки варьировалось в широком диапазоне – от 5 минут до 20 часов, что позволило зафиксировать как начальные стадии структурных изменений, так и установившееся состояние материала. Исследования проводили минимум на 20-ти образцах под каждый режим термической обработки. Отжиг производили в электропечи марки СНОЛ-1,6×2,5×1/11-М1. Колебание температуры при этом не превышало ± 5 °С. Полная матрица экспериментов представлена в таблице.

Измерение переходного электросопротивления являлось центральным методом исследования. Для проведения высокоточных измерений малых сопротивлений использовался специализированный микроомметр БСЗ-010-2. В качестве эталона для верификации показаний прибора использовалась образцовая мера электрического сопротивления 1 мкОм типа Р-310 класса точности 0,02 (ГОСТ 5.263-69).

Измерения проводились по четырехпроводной схеме, позволяющей исключить влияние сопротивления подводящих проводов и контактов. Процедура измерения включала следующие этапы:

1. Подготовленный образец помещался в измерительное устройство (рис. 2

а) таким образом, чтобы его плоские грани были строго перпендикулярны токоподводящим контакторам (I_1, I_2).

2. К отполированной верхней грани после точного центрирования подводились два игольчатых щупа-съемника напряжения (U_1, U_2).

3. Расстояние между точками ввода щупов (А) было строго фиксированным и составляло 800 мкм (рис. 2 б). Щупы располагались симметрично относительно линии сварного шва: один на медной, другой на алюминиевой стороне.

4. Точность позиционирования щупов и контроль расстояния А осуществлялись с помощью микроскопа МБС-1.

5. В ходе измерения через биметаллический образец пропускался постоянный ток стабильной величины, не превышающей 3 А.

6. Для обеспечения репрезентативности данных и исключения случайных погрешностей измерения проводились не менее чем в семи различных точках вдоль переходной зоны каждого образца. В каждой точке выполнялось 10 последовательных замеров. Итоговое значение сопротивления для данного режима обработки вычислялось как среднее арифметическое всех полученных значений.

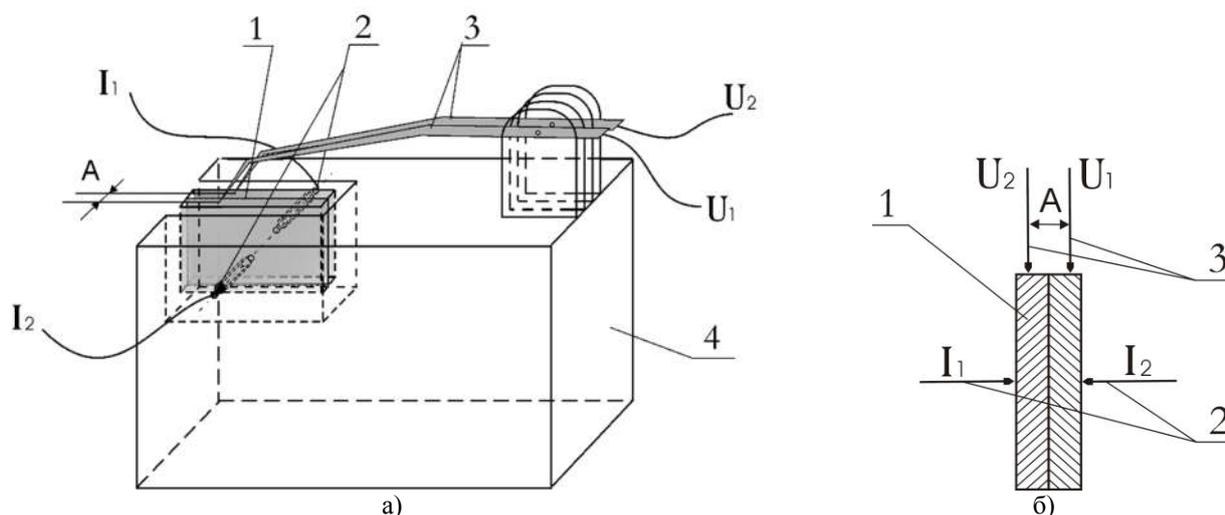


Рис. 2. Принципиальная схема измерения переходного электросопротивления:

а) общий вид устройства; б) схема расположения щупов на образце
где: 1 – биметаллический образец; 2 – токоподводящие контакторы;
3 – щупы-съемники напряжения; 4 – корпус устройства

Fig. 2. Schematic diagram of the transient electrical resistance measurement:
а) general view of the device; б) diagram of the probe arrangement on the sample
where: 1 – bimetallic sample; 2 – current-carrying contactors; 3 – voltage-removing probes;
4 – device housing

Для интерпретации данных электроизмерений и установления взаимосвязи между структурой композита и его электрофизическими свойствами проводился металлографический анализ. Изготовление

Результаты

Результаты измерения переходного электросопротивления для образцов в исходном состоянии представлены в табл. 2. Величина сопротивления образцов после сварки (тип А) составила 1,20 мкОм. После

микрошлифов, их травление и последующее исследование под оптическим микроскопом для визуализации микроструктуры переходной зоны, выявления интерметаллических фаз и измерения их толщины.

проведения холодной прокатки (тип Б) сопротивление возросло до 1,35 мкОм, что соответствует увеличению на 12,5 %.

Данный рост объясняется явлением наклёпа – упрочнения и увеличения плот-

ности дислокаций в металле в результате холодной пластической деформации. Дефекты кристаллической решетки (дислокации, вакансии, границы зерен) создают дополнительное рассеяние для носителей заряда, что и приводит к увеличению удельного электрического сопротивления материала в переходной зоне.

Анализ экспериментальных данных для температуры отжига 350 °С (режимы 1–6, таблица) показал следующую корре-

ляционную картину: при кратковременных выдержках (5 и 25 минут) наблюдается постепенное снижение сопротивления с 1,33 мкОм до 1,27 мкОм. При выдержке 45 минут (режим 3) достигается минимальное значение переходного сопротивления во всей серии экспериментов – 1,12 мкОм. Дальнейшее увеличение времени выдержки приводит к монотонному росту сопротивления: до 1,40 мкОм (60 мин), 1,80 мкОм (8 ч) и 2,35 мкОм (20 ч).

Таблица

Результаты измерения переходного электросопротивления биметаллических медно-алюминиевых образцов

Table

Results of measuring the transient electrical resistance of copper-aluminum bimetallic samples

№ п/п режима ТО	Параметры режима ТО		Электросопротивление, мкОм.
	Температура, °С	Время выдержки, мин.	
Образцы после сварки			1,20
Образцы после сварки и прокатки			1,35
1	350	5	1,33
2		25	1,27
3		45	1,12
4		60	1,40
5		480	1,80
6		1200	2,35
7	400	5	1,30
8		25	1,20
9		45	1,45
10		60	1,60
11		300	2,00
12		720	2,35
13	450	5	1,35
14		15	1,45
15		25	1,75
16		45	1,90
17		60	1,95
18		120	2,40
19		300	2,45
20		480	2,50
21	500	5	1,70
22		15	1,90
23		25	2,30
24		45	2,40
25		60	2,70
26		120	2,80
27		360	2,90

Эта кинетика наглядно демонстрирует конкуренцию двух процессов:

1. Снятие наклёпа: на начальной стадии отжига происходят процессы возврата и рекристаллизации. Происходит аннигиляция точечных дефектов, перераспределение и уменьшение плотности дислокаций. Это приводит к "оздоровлению" кристаллической решетки и снижению электросопротивления, что подтверждается данными измерения микротвердости, показывающими ее снижение в переходной зоне.

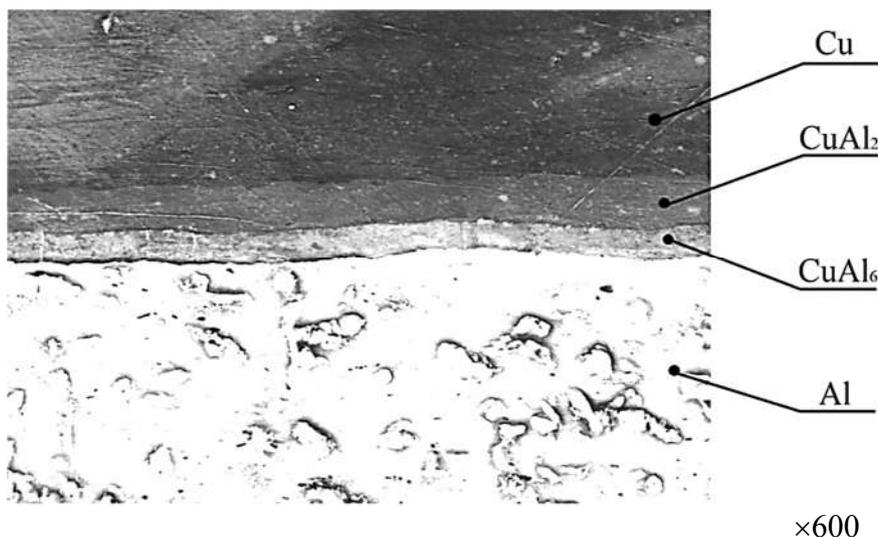


Рис. 3. Микроструктура композиционного материала медь-алюминий после термической обработки (для выявления микроструктуры использовали химическое травление в смеси азотной и уксусной кислот в соотношении 1:1 с добавкой 0,2 г. хлорного железа)
Fig. 3. Microstructure of a copper-aluminum composite material after heat treatment (to reveal the microstructure, chemical etching was used in a mixture of nitric and acetic acids in a 1:1 ratio with the addition of 0.2 g of ferric chloride)

Последующее исследование фазового состава интерметаллических прослоек методом электронно-зондового фазового анализа на рентгеновском микроанализаторе JCXA-733 Superprobe (JEOL), показало, что интерметаллический слой со стороны алюминия (рис. 3) соответствует фазе CuAl_6 , а интерметаллический слой со стороны меди соответствует фазе CuAl_2 . Т.е. можно говорить о том, что в ходе термообработки биметалла образуется два устойчивых типа интерметаллидов.

Аналогичная картина наблюдается и при 400 °С (режимы 7-12), однако кинетика процессов ускоряется. Минимальное значение сопротивления (1,20 мкОм) до-

2. Рост интерметаллидов: при продолжительных выдержках активируются процессы диффузии атомов меди и алюминия, что приводит к образованию и росту прослоек интерметаллических фаз в зоне соединения. Эти фазы, обладающие высоким удельным сопротивлением, создают барьер для прохождения тока, что и обуславливает рост общего переходного сопротивления. Металлографический анализ подтвердил появление и увеличение толщины этих прослоек при выдержках более 45 минут (рис. 3).

стигается уже после 25 минут выдержки (режим 8). Далее, уже после 45 минут (режим 9, 1,45 мкОм), начинается интенсивный рост сопротивления, что свидетельствует о более раннем начале активного образования интерметаллидов по сравнению с режимом 350 °С.

При нагревах до температур 450 °С и 500 °С фаза снижения сопротивления, связанная со снятием наклёпа, практически отсутствует (режимы 13-27). Рост сопротивления начинается с самых малых выдержек. При 450 °С сопротивление составляет 1,35 мкОм уже через 5 минут и монотонно растет до 2,50 мкОм через 8 часов. При 500 °С рост еще более интенсивен: с

1,70 мкОм (5 мин) до 2,90 мкОм (6 часов). Это свидетельствует о том, что при температурах выше 450 °С процессы диффузии идут настолько быстро, что образование интерметаллических прослоек начинается практически мгновенно после достижения образцом температуры печи. Время инкубационного периода, необходимое для снятия наклёпа, становится пренебрежимо малым по сравнению со скоростью роста интерметаллидов. Таким образом, доминирующим фактором, определяющим со-

противление с самых первых минут обработки, является формирование интерметаллических прослоек.

На основании комплексных металлографических исследований и измерений сопротивления была установлена зависимость величины переходного электросопротивления (p) от общей толщины (δ) интерметаллических фаз. Как показано на рис. 4, эта зависимость имеет нелинейный (параболический) характер.

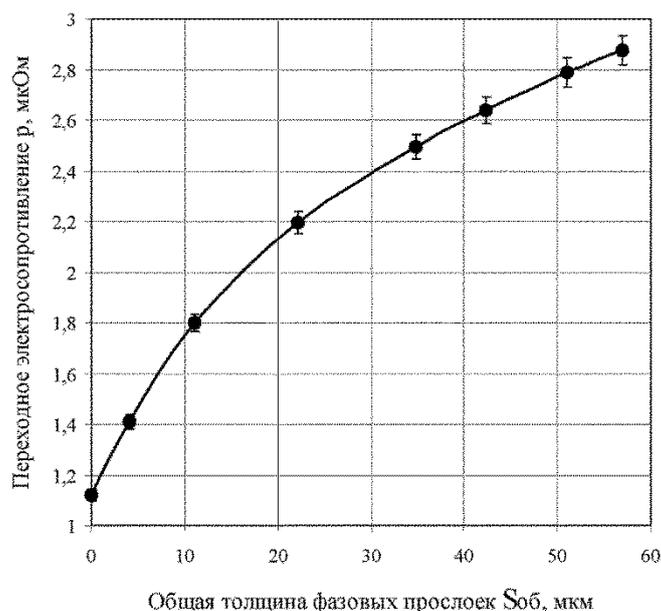


Рис. 4. Зависимость величины переходного электросопротивления биметалла от общей толщины фазовых прослоек

Fig. 4. Dependence of the transition electrical resistance of a bimetal on the total thickness of the phase layers

Такой характер зависимости хорошо согласуется с физической моделью, согласно которой интерметаллические прослойки действуют как барьер с высоким удельным сопротивлением, включенный последовательно в электрическую цепь. С увеличением толщины прослойки ее сопротивление растет линейно.

Однако наблюдаемый сверхлинейный (параболический) рост может быть объяснен дополнительными факторами:

- увеличением количества дефектов на границах раздела между интерметаллидами и основными металлами по мере роста фаз;

- возможным изменением состава и типа доминирующей интерметаллической фазы при увеличении времени и темпера-

туры отжига, что влечет за собой изменение ее удельного сопротивления;

- увеличением оплавленных участков металла на границах зерен внутри самой интерметаллической прослойки.

Для проведения сравнительной оценки было проведено измерение переходного сопротивления серийно выпускаемой биметаллической медно-алюминиевой первичной обмотки трансформатора тока, изготовленной по традиционной технологии (пакетной сварки прокаткой).

В результате было установлено, что ее переходное сопротивление составляет величину, в 2-2,5 раза превышающую сопротивление исследованного биметалла, полученного сваркой взрывом с последу-

ющей оптимизированной термической обработкой (режим 3, $p = 1,12$ мкОм).

Этот результат наглядно демонстрирует значительное преимущество использованной в работе комбинированной тех-

Заключение

Методом прецизионной микроометрии установлены количественные зависимости переходного электросопротивления биметалла медь-алюминий от режимов термической обработки. Показано, что его величина определяется конкуренцией двух процессов: снижением за счет снятия наклёпа и увеличением из-за роста интерметаллических фаз. Экспериментально выявлен оптимальный режим термической обработки, обеспечивающий минимальное переходное сопротивление 1,12 мкОм: отжиг при температуре 350 °С с выдержкой в печи в течение 45 минут. Установлено, что с повышением температуры термообработки кинетика роста интерметаллидов резко ускоряется. При температурах 450 °С и выше их образование начинается практически сразу, что исключает стадию

нологии (сварка взрывом + оптимизированный отжиг) с точки зрения обеспечения высоких электротехнических характеристик соединения.

снижения сопротивления и делает такие режимы неприемлемыми для улучшения электрофизических свойств. Металлографическим анализом подтверждена и количественно оценена корреляция между ростом переходного сопротивления и увеличением толщины интерметаллических прослоек. Установлена их параболическая зависимость. Проведенное сравнительное исследование доказало практическое преимущество разработанной технологии: переходное сопротивление исследованного биметалла в 2...2,5 раза ниже, чем у серийно выпускаемых изделий (обмоток трансформаторов), что свидетельствует о перспективности ее использования для производства высоконадежного и энергоэффективного электротехнического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. Учебник для высших учебных заведений. Москва: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. - 8-е изд., стереотип. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 648 с.
3. Кузьмин С.В., Лысак В.И., Чугунов Е.А. и др. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей. // Энергетик, 2001, № 9, С. 13-14.
4. Пеев А.П., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Новые конструкции токоподводящего узла катодной секции электролизера алюминия // Цветные металлы. 2002. – №8. С. 51-54.
5. Лысак В.И., Кузьмин С.В., Долгий Ю.Г. и др. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей // Энергетик, 1995, № 4, С. 7-10.
6. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. Москва: Машиностроение, 1987. 216 с.
7. Zhao, Y. Y., Li, D. & Zhang, Y. S. Effect of welding energy on interface zone of Al-Cu ultrasonic welded joint. *Sci. Technol. Weld. Joining*. 2013. Vol. 18: 354–360.
8. Lee, K. S. & Kwon, Y. Solid-state bonding between Al and Cu by vacuum hot pressing. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2013. Vol. 23: 341–346.
9. Крюков Д.Б., Хорин А.В., Спиринов М.Н. Структурные особенности высоконадежных медно-алюминиевых композитов, полученных с применением технологии сварки материалов взрывом. В сборнике: Современные проблемы машиностроения. Труды V Международной научно-технической конференции. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). 2010. С. 225-228.
10. Лось И.С., Крюков Д.Б., Хорин А.В. Медно-алюминиевые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 5 (65). С. 88-92
11. Крюков Д.Б., Перельгин Ю.П. Энергоэффективные композиционные медно-алюминиевые материалы, полученные с применением технологии сварки взрывом / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4 (72). С. 130-142.
12. Rozen A.E., Los I.S., Kryukov D.B., Denisov I.V., Khorin A.V., Pervukhin L.B., Pervukhina O.L. Multilayer Clad Metals by Explosive Welding // Shock-assisted materials synthesis and processing:

Science, innovations, and industrial implementation (EPNM-2008). 2008. С. 105.

13. Розен А.Е., Крюков Д.Б., Хорин А.В., Гуськов М.С. Разработка технологических схем сварки взрывом композиционного материала системы алюминий-медь. В сборнике: *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVIII Всероссийской научно-практической*

конференции под ред. Е.В. Протопопова. 2014. С. 281-287.

14. Крюков Д.Б. Получение тонколистового биметалла медь-алюминий сваркой взрывом и исследование его структуры и свойств: специальность 05.02.01 Материаловедение (Машиностроение): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пензенский государственный университет. Пенза, 2003. 187 с.

REFERENCES

1. Lakhtin YuM, Leontieva VP. Material science: textbook for higher education institutions. Moscow: Mashinostroenie; 1990.
2. Arzamasov BN, Makarova VI, Mukhin GG. Materials science: textbook for universities. 8th ed. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University; 2008.
3. Kuzmin SV, Lysak VI, Chugunov EA. Energy-saving composite elements of current-carrying units of power electric circuits. *Energetik*. 2001;9:13-14.
4. Peev AP, Kuzmin SV, Lysak VI. New designs of current-carrying unit of the cathode section of the aluminum electrolyzer. *Non-ferrous Metals*. 2002;8:51-54.
5. Lysak VI, Kuzmin SV, Dolgy YuG. New bimetallic transition elements for electric power circuits. *Energetik*. 1995;4:7-10.
6. Konon YuA, Pervukhin LB, Chudnovsky AD. Explosion welding. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
7. Zhao YY, Li D, Zhang YS. Effect of welding energy on interface zone of Al-Cu ultrasonic welded joint. *Sci. Technol. Weld. Joining*. 2013;18: 354–360.
8. Lee KS, Kwon Y. Solid-state bonding between Al and Cu by vacuum hot pressing. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2013;23:341–346.
9. Kryukov DB, Khorin AV, Spirin MN. Structural features of highly reliable copper-aluminum composites obtained using explosion welding technology. *Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference, 2010: Modern Problems of Mechanical Engineering*; Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University (TPU); 2010. p. 225-228.
10. Los IS, Kryukov DB, Khorin AV. Copper-aluminum composite materials obtained by explosion welding. *Science Journal of Volgograd State University*. 2010;5(65):88-92.
11. Kryukov DB, Perelygin YuP. Energy-efficient composite copper-aluminum materials obtained using explosion welding technology. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*. 2024;4(72):130-142.
12. Rozen AE, Los IS, Kryukov DB, Denisov IV, Khorin AV, Pervukhin LB, Pervukhina OL. Multi-layer clad metals by explosive welding. *Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation (EPNM-2008)*. 2008.
13. Rosen AE, Kryukov DB, Khorin AV, Guskov MS. Development of technological schemes for explosive welding of aluminum-copper composite material. *Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference, 2014: Metallurgy: Technology, Management, Innovation, Quality*; 2014. p. 281-287.
14. Kryukov DB. Production of copper-aluminum sheet metal by explosion welding and study of its structure and properties [dissertation]. [Penza (RF)]: Penza State University; 2003.

Информация об авторе:

Крюков Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «СЛПиМ» Пензенского государственного университета, тел.: 8-903-324-97-34.

Kryukov Dmitry Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University, phone: 8-903-324-97-34.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 25.11.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 29.12.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 25.11.2025; approved after review on 08.12.2025; accepted for publication on 29.12.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.