

УДК 621.793.79

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-6-301-24-28

*Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев, О. В. Слаутин, Д. Э. Седов***К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СЛОИСТЫХ
МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОМПОЗИТОВ И ПОКРЫТИЙ****Волгоградский государственный технический университет**e-mail: leongur@mail.ru, avatar@mail.ru, slautin@vstu.ru,
sedov.dima2003@yandex.ru

Представлены результаты исследования удельной электропроводности в слоистых композициях систем Al-Cu, Cu-Ti и Ti-Fe. Выявлено, что электропроводность диффузионной зоны значительно отличается от электропроводности металлов, образующих слоистый металло-интерметаллидный композит. Установлено, что общая тенденция изменения удельной электрической проводимости диффузионной зоны в СКМ исследуемых систем хорошо коррелирует с ранее выявленным характером изменения значений теплопроводности.

Ключевые слова: слоистые металло-интерметаллидные композиты, диффузионная зона, теплопроводность, электропроводность

*L. M. Gurevich, D. V. Pronichev, O. V. Slautin, D. E. Sedov***ON THE QUESTION OF ASSESSING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF LAYERED METAL-INTERMETALLIC COMPOSITES AND COATINGS****Volgograd State Technical University**

The results of the study of specific electrical conductivity in layered composites of the Al-Cu, Cu-Ti and Ti-Fe systems are presented. It is revealed that the electrical conductivity of the diffusion zone differs significantly from the electrical conductivity of the metals that form the layered metal-intermetallic composite. It is established that the general trend of change in the specific electrical conductivity of the diffusion zone in the SCM of the studied systems correlates well with the nature of the change in the thermal conductivity values obtained when determining the values of the latter on identical composites using a similar technology.

Keywords: layered metal-intermetallic composites, diffusion zone, thermal conductivity, electrical conductivity

Введение

Многолетний опыт промышленного использования слоистых металлических композиционных материалов (СКМ) различных систем в качестве узлов и конструкций энергетического, нефтехимического и другого оборудования подтвердил их высокую эксплуатационную надежность и определил необходимость проведения в дальнейшем комплексных исследований для оценки их эксплуатационных свойств, в том числе электро- и теплофизических. Для создания на основе СКМ слоистых металло-интерметаллидных композитов (СМИК) на кафедре «Материаловедение и КМ» ВолгГТУ научной школой д.т.н., профессора Ю. П. Трыкова [1–6] была разработана многоэтапная технология получения, включающая сварку взрывом (СВ), горячую прокатку на необходимую толщину и диффузионный отжиг (ДО). Определение теплофизических и электрофизических характеристик СМИК является одной из приоритетных задач, учитывая возможные области их применения. Дальнейшим направлением реали-

зации разработанной технологии является создание функциональных (износостойких, жаростойких) покрытий на поверхности металлов на основе интерметаллидов различных систем в результате гомо- и гетерогенных реакций в слоистых металлических системах с применением высококонцентрированных источников энергии.

При проектировании и создании деталей из практически актуальных СКМ и СМИК, кроме индивидуальных особенностей конструкции и химического состава, многообразие технологических и структурных факторов вносят коррективы в электро- и теплофизические характеристики. К числу таких факторов относятся, например: искажения кристаллической решетки в металле слоев вследствие интенсивной пластической деформации под действием взрывного нагружения свариваемых пластин, наличие зон механического упрочнения (ЗМУ) вблизи границы соединения, сплошные слои и отдельные включения оплавленного металла, образовавшиеся при СВ, диффузионные про-

слойки или диффузионные зоны (ДЗ), возникающие после высокотемпературного нагрева, и наклеп металла при обработке давлением (ОД).

Целью настоящей работы является определение электрофизических свойств СМИК и металло-интерметаллидных покрытий практически-актуальных систем с использованием стандартных методик и их адаптации с учетом осо-

бенностей исследования металло-интерметаллидных систем.

Материалы и методы исследования

Для исследований использовались полученные с помощью СВ СКМ и СМИК систем Cu-Al, Ti-Cu и Ti-Fe, значения толщин слоев которых приведены в таблице.

Характеристики конструкции сваренных взрывом слоистых композитов

Система	Толщины исходных слоев, мм			
	Медь М1	алюминий АД1	титан ВТ1-0	Сталь Ст3
Cu-Al	6,5	5,5	–	–
Ti-Cu	4	–	4	–
Ti-Fe	–	–	4	6

В [7] показано, что искусственно созданные слои, формирующиеся на межслойных границах полученных СВ СКМ и СМИК рассмотренных систем, могут быть результатом либо процесса СВ (появление ЗМУ), либо их ДО по режиму, обеспечивающему твердофазное или жидкофазное взаимодействия составляющих СКМ слоев металлов (появление ДЗ). Синтезированные слои (ЗМУ или ДЗ) обладают значительно меньшими значениями теплопроводности в сравнении с характеристиками исходных металлов, составляющих СКМ (СМИК).

Так как природа тепло- и электропроводности в металлических системах близка, следует ожидать снижения и соответствующих значе-

ний электропроводности для ЗМУ и ДЗ.

Изменение электропроводности СКМ и СМИК оценивали с помощью токовихревого измерителя «Константа-6К» по методике, представленной в [8].

Поскольку глубина проникновения вихревого поля значительно меньше начальных толщин слоев, то измерения проводили на образцах, которые последовательно утонялись механической обработкой (рис. 1). Эксперимент проводился на образцах двух типов (рис. 1): I – с последовательным утонением слоя М1 и II – АД1 (ВТ1-0) с шагом $\approx 0,05$ мм, что позволило получить распределение $\gamma_{СКМ}$ по толщине СКМ (рис. 2 а, в).

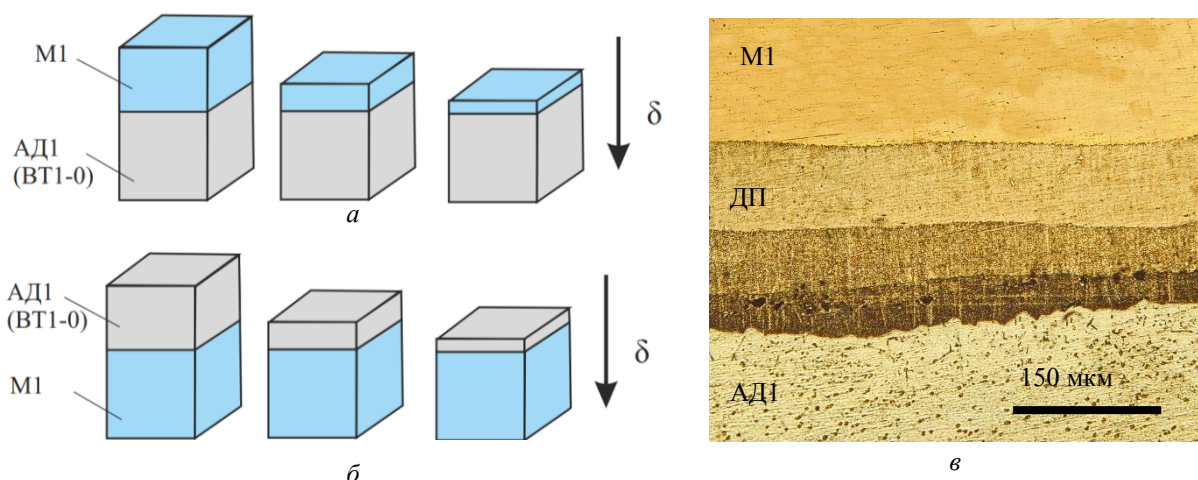


Рис. 1. Схема послойного стачивания образцов СКМ состава М1 + АД1 (ВТ1-0): а – образец I типа; б – образец II типа; в – микроструктура исследуемой области слоистого интерметаллидного композита АД1+М1

Глубину проникновения вихревых токов используемой в токовихревом измерителе «Константа-6К» частоты определяли по зависимости [9]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\gamma \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu}}, \quad (1)$$

где γ – удельная электрическая проводимость материала ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$); f – частота тока, Гц; μ_0 – магнитная постоянная $4\pi \cdot 10^{-7} (\text{Гн/м})$; μ – относительная магнитная проницаемость материала. При частоте 20 кГц, реализованной в приборе «Константа-6К», глубина проникновения вихревых токов в меди составила 0,36 мм, в алюминии – 0,21 мм, и в титане – 1,3 мм.

Измеритель «Константа-6К» не позволяет проводить исследования сплавов на основе железа, поэтому определение значений γ для составляющих титано-стального СКМ, как предложено в [9], осуществляли лишь для слоя ВТ1-0.

Параллельно проводили исследование распределения микротвердости по толщине темплета, поперечного поверхности соединения полученных СВ композитов, с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что после СВ в СКМ составов М1 + АД1 и ВТ1-0 + М1 было зафиксировано наличие ЗМУ с толщинами ≈ 190 и ≈ 240 мкм соответственно. В СКМ М1 + АД1 твердость ЗМУ со стороны М1 составила $1,7 \div 1,8$ ГПа, а со стороны АД1 – $0,7 \div 0,75$ ГПа. В СКМ ВТ1-0 + М1 твердость ЗМУ составила $4,2 \div 4,5$ ГПа со стороны ВТ1-0 и $1,9 \div 2,3$ ГПа со стороны М1.

Анализ результатов замера электропроводности в СКМ систем Cu-Al (рис. 2, а) и Cu-Ti (рис. 2, в) после СВ при отсутствии ДЗ на границе соединения слоев показал, что изменение $\gamma_{\text{СКМ}}$ в анализируемом слое подчиняется правилу смеси:

$$\gamma_{\text{СКМ}(\text{Cu-Al})} = n_{\text{Cu}} \cdot \gamma_{\text{Cu}} + n_{\text{Al}} \cdot \gamma_{\text{Al}}; \quad (2)$$

$$\gamma_{\text{СКМ}(\text{Ti-Cu})} = n_{\text{Cu}} \cdot \gamma_{\text{Cu}} + n_{\text{Ti}} \cdot \gamma_{\text{Ti}}, \quad (3)$$

где n_{Cu} , n_{Al} и n_{Ti} – соответственно объемные доли меди М1, алюминия АД1 и титана ВТ1-0, $\gamma_{\text{СКМ}}$, γ_{Cu} , γ_{Al} , γ_{Ti} – соответственно удельная электропроводность СКМ, меди М1, алюминия АД1 и титана ВТ1-0.

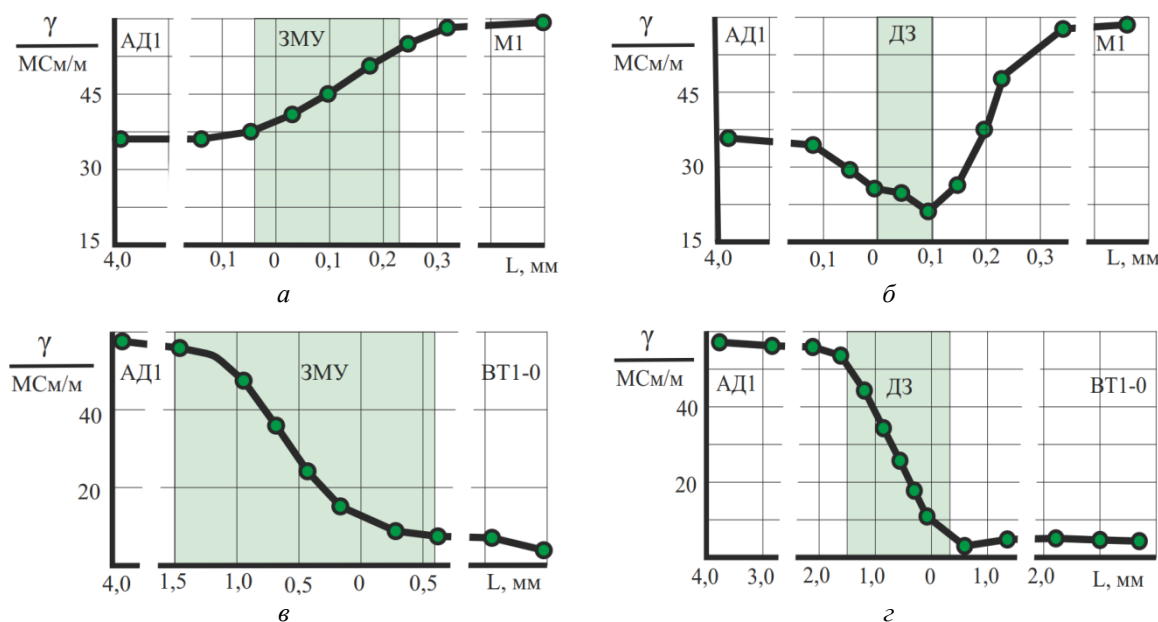


Рис. 2. Распределение удельной электропроводности в ОШЗ СКМ состава М1 + АД1 (а, б) и ВТ1-0 + М1 (в, г) после СВ (а, в) и последующей ТО (б, г) по твердофазному режиму для системы Cu-Al (530° , 30 ч) и по режиму КП для системы Ti-Cu (900° , 1 ч) соответственно

В СКМ М1 + АД1 $\gamma_{\text{СКМ}}$ меняется от 34 МСм/м (для слоя Al) до 59 МСм/м с приближением к слою Cu (рис. 2, а). В СКМ ВТ1-0 + М1 $\gamma_{\text{СКМ}}$ понижается до $1,7\text{--}2,0$ МСм/м с приближением к слою Ti (рис. 2, в). Таким образом ЗМУ, образовавшиеся при СВ, практически не оказывают

влияния на $\gamma_{\text{СКМ}}$. Это не удивительно, так как повышение плотности дислокаций слабо влияет на электропроводность использованных металлов. Например, в электротехнике используют листы меди по ГОСТ 495–92 твердостью примерно 45 МПа, называемую мягкой медью

М1м, и твердостью 110 МПа, называемую твердой М1т. Медь М1м имеет проводимость всего на 3...5 % выше, чем у твердой меди М1т [13].

С целью установления влияния на $\gamma_{СКМ}$ ДЗ, сформированной на межслойной границе СКМ, исследования проводились на образцах после ДО по следующим режимам:

530 °С, 30 ч – для системы Cu-Al, обеспечивающему твердофазное взаимодействие;

900 °С, 1 ч – для системы Ti-Cu, обеспечивающему контактное плавление (КП). При этом определенные металлографически толщины ДЗ имели следующие значения ≈ 160 мкм и $\approx 1,9$ мм соответственно.

Анализ экспериментальных данных показал, что образовавшаяся ДЗ на основе алюминидов меди приводит к существенному изменению характера распределения $\gamma_{СКМ}$ по сравнению с СКМ после СВ. Сами значения $\gamma_{ДЗ}$ оказались на уровне $21 \div 23$ МСм/м, что в $1,5 \div 1,7$ и $2,6 \div 2,8$ раза меньше, чем у Al и Cu, соответственно (рис. 2, б). Значения $\gamma_{ДЗ}$, состоящей из купридов титана в СКМ системы Ti-Cu, находились на уровне $0,77 \div 0,9$ МСм/м, что $67 \div 80$ и в $2,0 \div 2,3$ раз меньше, чем Cu и Ti, соответственно (рис. 2, в).

Анализ результатов исследований изменения электропроводности, у СКМ состава ВТ1-0 + Ст3 проводился по двум методикам. Первая серия замеров осуществлялась после СВ с поверхности слоя Ti через ≈ 50 мкм в направлении границы раздела металлов. Установлено падение γ Ti слоя (рис. 3, кривая 1) с $1,9$ МСм/м ($0,55$ мм от границы раздела металлов) до нижнего предела измерений прибора $0,6$ МСм/м ($0,1$ мм до границы раздела). После ТО при 1000 °С в течение 10 ч в слое ВТ1-0 сформировалась ДЗ толщиной ≈ 500 мкм (химический и фазовый состав ДЗ приведен в [10–12]). Замеры γ показали, что ее падение начинается на удалении от границы раздела слоев ≈ 1 мм. Полученное значение $\gamma_{ДЗ}$ ниже предела измерений прибора, и, как минимум, в 3 раза ниже соответствующих значений для слоя Ti (кривая 2).

Вторая серия замеров осуществлялась на идентичном образце, но со стороны ДЗ. Анализ полученных данных (кривая 3) показал, что при удалении от ДЗ наблюдается интенсивный рост $\gamma_{ДЗ}$, значения которой на расстоянии $0,45$ мм соответствуют γ титана, однако первое регистрируемое прибором «Константа-6К» такое значение появляется только на расстоянии $\approx 0,2$ мм от границы раздела.

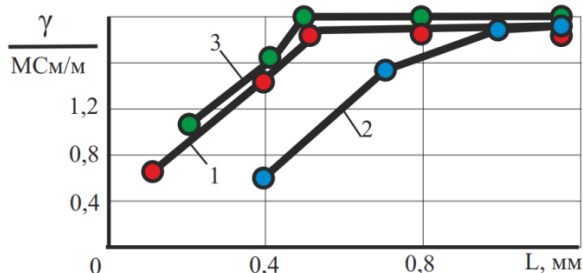


Рис. 3. Изменение величины удельной электрической проводимости в титановом слое от расстояния до границы раздела в титано-стальном СКМ после СВ (1) и ТО (1000 °С, 10 часов) (2, 3). Направление замера: 1, 2 – к границе; 3 – от границы раздела

Выводы

1. Измерение электропроводности слоистых материалов методом вихревых токов в сочетании с послойным стачиванием позволяет определить удельную электропроводность диффузионных прослоек, формирующихся на границе соединения слоев. Полученные экспериментальные данные показывают, что электропроводность диффузионной зоны значительно ниже электропроводности металлов, образующих СММК.

2. Существенным ограничением применяемого метода является невозможность работы с ферромагнитными материалами, в первую очередь с большинством видов сталей. Точность метода в значительной мере определяется удельной проводимостью исследуемых материалов: чем она выше, тем меньше глубина проникновения вихревых токов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков, Ю. П. Композиционные переходники / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград : Политехник, 2007. – 328 с.
2. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Металлургиздат, 2016. – 346 с.
3. Структура и теплофизические свойства слоистых интерметаллидных композитов / Ю. П. Трыков, А. П. Ярошенко, Д. В. Проничев, Р. К. Ткачев // Сварочное производство. – 1997. – № 7. – С. 5–8.
4. Исследование теплопроводности слоистых металлических композитов / Д. В. Проничев, Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5(31) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – С. 34–36.
5. Исследование теплопроводности сваренного взрывом медно-алюминиевого композита / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15(118) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 30–34.
6. Исследование теплофизических свойств интерметаллидного композиционного материала титан-медь / Д. В. Проничев, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов [и др.] //

Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15(118) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 16–19.

7. Трыков, Ю. П. Диффузия в слоистых композитах / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова. – Волгоград : Политехник, 2006. – 402 с.

8. Проничев, Д. В. Применение токовихревого метода для исследования удельной электропроводности слоистых интерметаллидных композитов / Д. В. Проничев, Ю. П. Трыков, М. Д. Трунов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(96) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – С. 41–43.

9. Исследование тепло- и электропроводности СИК титан-сталь / Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев, Л. М. Гуревич [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении» ; вып. 4). – С. 17–21.

10. Структура и свойства слоистых металло-интерметаллидных композитов системы Ti - Fe / О. В. Слаутин, В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (ф. т. Сириус, 7–12 октября 2024 г.) : сб. тез. докл. В 7 т. Т. 1 / РХО им. Д. И. Менделеева [и др.]. – Москва, 2024. – С. 303.

11. О взаимодействии компонентов в титано-стальном композите / Ю. П. Трыков, В. Н. Арисова, О. В. Слаутин, В. Г. Шморгун // Перспективные материалы. – 2004. – № 6. – С. 43–47.

12. Формирование диффузионной прослойки в титаностальном композите / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, Д. Ю. Донцов, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 6. – С. 39–42.

13. Никулин, Н. В. Электроматериаловедение / Н. В. Никулин. – Москва : Высшая школа, 1984. – 176 с.