

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ СПЛАВА AL–ZN–SN, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КОНТАКТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ*

С.И. Баранов, Л.Н. Баёв, И.А. Кравченкова,
А.Н. Кравченков, С.В. Михайлюк, А.Д. Шляпин

Рассмотрена возможность применения в качестве антифрикционного материала сплава Al–Zn–Sn, полученного методом контактного легирования сплава Al–Zn (40 % масс.) из расплава олова. Исследованы микроструктура и антифрикционные свойства материала Al–Zn–Sn и классического антифрикционного сплава АО20-1. Из анализа микроструктуры Al–Zn–Sn установлено, что олово проникает в объем сплава Al–Zn (40 % масс.) преимущественно по цинковым каналам и представляет собой в межграничном пространстве алюминиевой фазы эвтектическую смесь состава Sn–Zn. Такое сочетание структурных составляющих в приповерхностном слое сплава Al–Zn–Sn уменьшает коэффициент трения. Показано, что композиционный материал Al–Zn–Sn обладает лучшими антифрикционными свойствами, чем классический антифрикционный материал АО20-1.

Ключевые слова: контактное легирование, алюминий, цинк, олово.

Введение

Во всем мире большое внимание уделяется вопросам снижения энергозатрат на трение, повышению долговечности и надежности узлов трения скольжения. Среди подходов, используемых для решения данной проблемы, можно выделить создание новых антифрикционных материалов.

Авторами статьи ведется многолетняя работа по получению новых антифрикционных композиционных материалов на основе систем несмешивающихся компонентов [1–3]. Такие материалы создают методом *контактного легирования*, при котором на поверхности твердого легируемого материала образуется слой со значительным содержанием мягких легкоплавких элементов. В результате сочетания твердых и мягких элементов в легированном слое значительно повышается уровень антифрикционных свойств.

Метод контактного легирования обладает рядом преимуществ перед другими методами получения антифрикционных материалов. Главными из них являются отсутствие потребности в специальном оборудовании и возможность экономить дорогостоящее и дефицитное сырье.

Целью данной работы явилось изучение микроструктуры и антифрикционных свойств нового сплава Al–Zn–Sn, полученного методом контактного легирования, а также его сравнение с классическим антифрикционным сплавом АО20-1.

Исследование микроструктуры

Использование антифрикционных сплавов на основе алюминия распространено довольно широко [4, 5]. Это связано с повышенной прочностью таких сплавов, высокой коррозионной

* Статья подготовлена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., государственный контракт № 16.740.11.0651 от 02 июня 2011 г.

стойкостью, небольшой массой, хорошей теплопроводностью и низкой стоимостью.

Наиболее известным антифрикционным сплавом, в котором чистый алюминий используется в качестве основы, является сплав АО20-1 (состав: Al – 74,35...82,28 %, Sn – 17...23 %, Cu – 0,7...1,2 %). Фотография его микроструктуры представлена на рис. 1.

Однако у сплавов на основе алюминия имеются значительные недостатки:

- технология их получения состоит из большого числа операций (плавка, непрерывная разливка, механическая обработка, прокатка, резка полос по размеру и отжиг), в которых задействовано более пяти единиц оборудования;
- создание подобных сплавов затруднено тем, что химическое соединение алюминия с оловом не образуется – каждый элемент в сплаве является отдельной фазой, не обладающей взаимной растворимостью.

Легирование сплава Al–Zn (40 % масс.) в расплаве Sn. В качестве альтернативы сплавам на основе Al, и в частности сплаву АО20-1, была предпринята попытка создать материал, содержащий кроме алюминия значительное количество олова в поверхностном слое [6]. Получение легированного оловом слоя стало возможным благодаря хорошо зарекомендовавшему себя методу контактного легирования, осуществляемому путем легирования сплава Al–Zn, содержащего 40 % цинка по массе, из расплава чистого олова.

Применение сплава Al–Zn (40 % масс.) обусловлено тем, что цинк при температуре контактного легирования находится в состоянии,

близком к жидкому, что значительно ускоряет процесс миграции олова в объем легируемого материала. На рисунке 2 представлена микроструктура сплава Al–Zn (40 % масс.). Структура этого сплава представляет собой алюминиевую матрицу с равномерно распределенными каналами цинка.

В результате погружения сплава Al–Zn (40 % масс.) в расплав олова происходит миграция Sn в объем легируемого материала преимущественно по цинковым каналам, и на поверхности материала образуется легированный слой. Глубина легированного слоя может меняться за счет изменения времени выдержки легируемого образца в легирующем расплаве. У современных подшипников глубина рабочей зоны составляет 250 мкм. Для получения такой глубины требуется выдержка образца в легирующем расплаве в течение 20 мин.

Для уточнения механизма миграции олова в легируемый сплав были проведены исследования микроструктуры легированного слоя и зоны контакта легируемого образца с легирующим расплавом методом электронной сканирующей микроскопии. На рисунке 3 представлена микроструктура легированного слоя композиционного материала, содержащего в цинковом канале олово. Из рисунка видно, что в цинковом канале присутствует значительное количество олова (темные полосы на светлом фоне).

На рисунке 4 показана микроструктура зоны контакта сплава Al–Zn (40 % масс.) с легирующим расплавом Sn. Из рисунка видно, что олово расположено между зернами алюми-

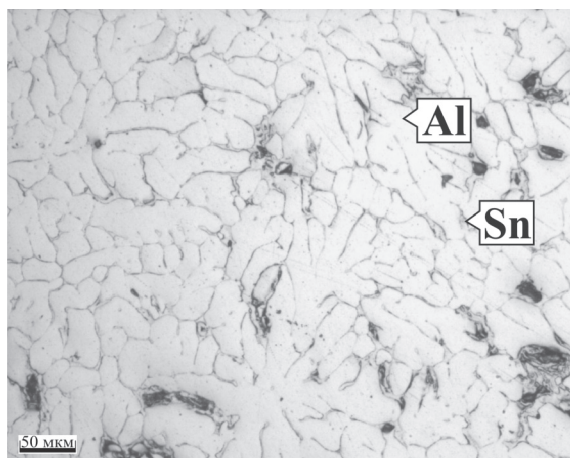


Рис. 1. Микроструктура антифрикционного сплава АО20-1 (светлые участки – алюминий, темные – олово)

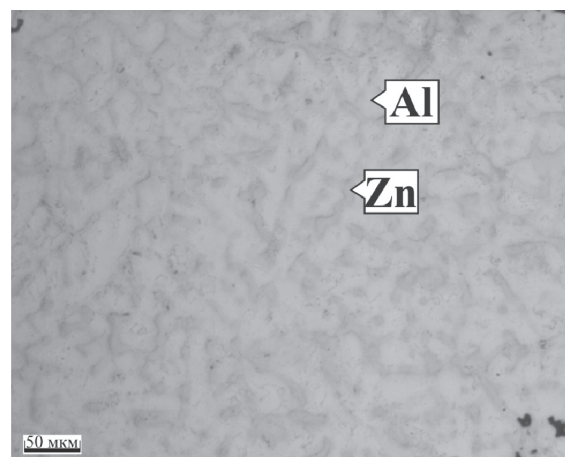


Рис. 2. Микроструктура сплава Al–Zn (40 % масс.) (светло-серая основа – алюминий, более темные участки – цинковые каналы)

ния, а цинк и алюминий присутствуют в области расплава. Из этого следует, что в процессе взаимодействия олова со сплавом $Al-Zn$ (40 % масс.) происходит не только проникание олова в объем легируемого сплава, но и «вырывание» частиц алюминия и цинка в объем расплава олова. Такое взаимодействие обеспечивается диффузионными процессами, возникающими при контакте расплава олова со сплавом $Al-Zn$ (40 % масс.). Именно наличие цинка в легируемом сплаве приводит к подобному взаимодействию, а главное, к прониканию олова в объем легируемого сплава по жидким каналам цинка.

Легирование чистого алюминия в расплаве Sn и сравнение с легированием $Al-Zn$ (40 % масс.). При контактном легировании чистого алюминия из расплава олова (в режиме контактного легирования $Al-Zn$ (40 % масс.) из расплава олова) его проникания в объем легируемого материала не наблюдалось. При длительной выдержке (более 1 ч) чистого алюминия в легирующем расплаве удавалось добиться неравномерного проникания олова, иногда сопровождающегося сильным разрушением легируемого материала.

В данном исследовании время контактного легирования составляло как минимум 1–1,5 ч; при меньшем времени выдержки проникание Sn в объем Al отсутствовало.

Механизм проникания олова в объем чистого алюминия имеет значительные отличия от проникания олова в объем сплава $Al-Zn$ (40 % масс.). В последнем случае проникание Sn осуществлялось преимущественно по каналам Zn,

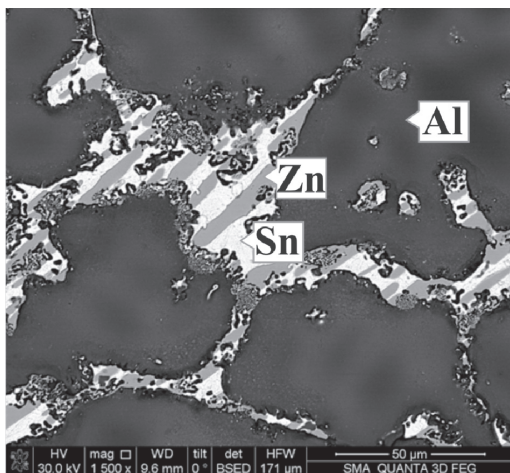


Рис. 3. Микроструктура участка композиционного материала $Al-Zn-Sn$, содержащего цинковый канал

а при контактном легировании чистого алюминия Sn проникало по границам зерен Al .

Кроме того, миграция олова в объем чистого алюминия сопровождалась не только прониканием, но и активным разрушением алюминия (рис. 5). Активное разрушение легируемого материала является серьезной проблемой данного процесса, которая еще ждет своего решения. При легировании сплава $Al-Zn$ (40 % масс.) наблюдался минимальный эффект разрушения.

Важно отметить, что для осуществления миграции олова в объем чистого алюминия необходимо гораздо большее время выдержки в расплаве, чем при легировании сплава $Al-Zn$ (40 % масс.). В случае легирования сплава минимальное время выдержки составляло 15–30 мин, а при контактном легировании чистого алюминия, как уже отмечалось выше, 1–1,5 ч. При этом качество легированного слоя и поверхности легируемого материала получалось выше при контактном легировании сплава $Al-Zn$ (40 % масс.).

Легирование чистого алюминия из расплава Sn, содержащего Zn. Одним из направлений проведенных исследований было рассмотрение возможности получения композиционного материала методом контактного легирования чистого Al из расплава олова, содержащего цинк.

В результате добавления в разных количествах цинка к легирующему расплаву олова наблюдалось проникание элементов расплава

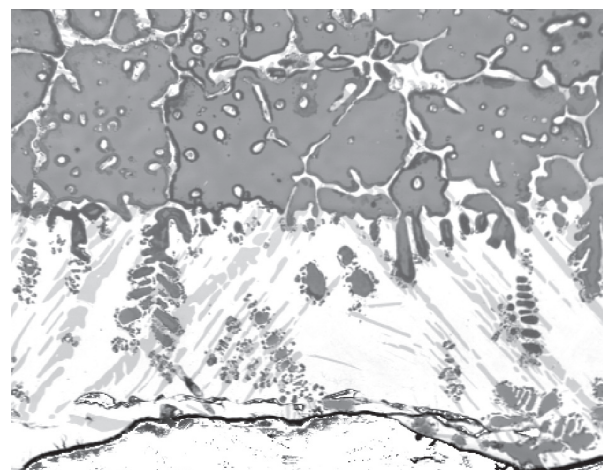


Рис. 4. Микроструктура зоны контакта сплава $Al-Zn$ (40 % масс.) с легирующим расплавом Sn: в нижней части – легирующий расплав (олово), в верхней части – легируемый сплав $Al-Zn$ (40 % масс.)

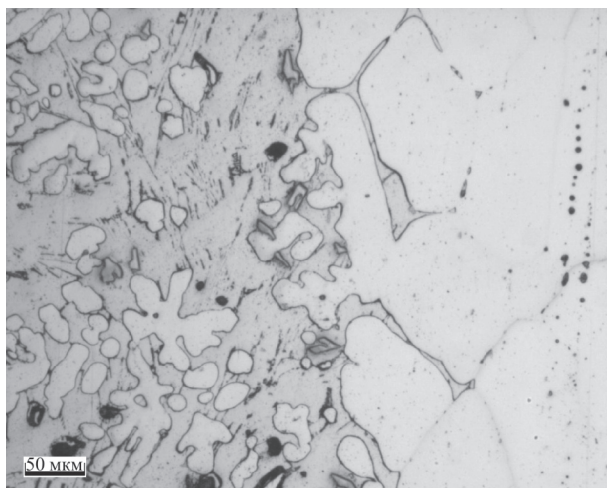


Рис. 5. Микроструктура зоны контакта алюминия с оловом

в объем чистого алюминия. Уменьшение содержания Sn в легирующем расплаве до 20 % по массе способствовало улучшению процесса контактного легирования. При этом время выдержки легируемого материала (чистого алюминия) в легирующем расплаве (Zn–Sn (20 % масс.)) уменьшили до 30 мин.

Было установлено, что цинк выполняет функцию «элемента-лидера», обеспечивающего миграцию олова в объем чистого алюминия. Существенным недостатком такого способа контактного легирования является плохая воспроизводимость процесса контактного легирования и склонность к образованию пор большого размера.

Таким образом, использование в качестве основы сплава, содержащего элемент-лидер (цинк), позволило добиться хорошей воспроизводимости процесса проникания олова в объем легируемого материала, высокой скорости контактного легирования, равномерного распределения легируемого материала по объему легированной зоны при сохранении геометрии легируемого образца.

Наличие олова и цинка в межграницном пространстве алюминия дает возможность реализовать принцип Шарпи. Создание легированного слоя в сплаве Al–Zn (40 % масс.) с содержанием олова до 20 % и возможность повторного использования расплава олова для проведения контактного легирования позволяет экономить дорогостоящее и дефицитное олово.

Благодаря хорошей воспроизводимости процесса контактного легирования можно по-

лучить легированный слой толщиной 250 мкм за короткий промежуток времени. При этом скорость контактного легирования составляет 1 мм за 5 мин.

Сравнение антифрикционных свойств сплавов Al–Zn–Sn и АО20-1

Для определения возможности использования полученного композиционного материала Al–Zn–Sn в качестве антифрикционного были проведены исследования уровня антифрикционных свойств.

Как уже упоминалось, самым распространенным антифрикционным материалом на основе алюминия является сплав АО20-1. Этот сплав идентичен по химическому составу полученному авторами композиционному материалу Al–Zn–Sn и поэтому был выбран для сравнения уровней антифрикционных свойств.

Для того чтобы определить антифрикционные свойства сплавов Al–Zn–Sn и АО20-1, были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 35 мм и толщиной 7,5 мм.

Испытания проводились по схеме «стержень – диск» в соответствии с методикой выполнения измерений коэффициента трения f и износа I на приборе *Tribometer* (фирма CSM, Швейцария).

Условия испытаний:

- прикладываемая нагрузка – 1 Н;
- материал контртела – 100Cr6;
- диаметр контртела (шарика) – 6 мм;
- линейная скорость вращения образца – 30 см/с;
- пробег контртела по образцу – 56,5 м.

Пятно износа контртела – стального шарика – наблюдалось на оптическом микроскопе *Axiocvert 25* (Carl Zeiss). Площадь сечения и глубина бороздки износа на образцах определялись на контактном профилометре SJ-402 (Mitutoyo). Результаты измерений обрабатывались с помощью компьютерной программы *InsrturnX for Tribometer* (CSM Instr.). Полученные значения износа образца и коэффициента трения приведены в табл. 1.

В ходе испытаний обоих образцов наблюдалось налипание продуктов износа на контртело, поэтому его износ определить не удалось. Наибольшее налипание отмечалось на образце АО20-1.

Испытания образца АО20-1 были остановлены после 1000 циклов из-за его катастро-

Таблица 1

Результаты трибологических испытаний

Образец	Пробег, циклы/м	Износ I образца, $10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$	Коэффициент трения f		
			максимальный	средний	конечный
Al-Zn-Sn	1000/56,5	5,98	0,32	0,27	0,29
AO20-1		14,9	0,61	0,49	0,52

фического износа, а также ярко выраженных «навалов» по краям пятна износа, заметных на профилограмме.

На рисунке 6 представлены профилограммы образцов и микроструктуры зон износа. Анализ данного рисунка показывает, что более высокая степень деформации после трибологических испытаний наблюдается у сплава AO20-1. Наличие олова в поверхностном слое сплава Al-Zn-Sn уменьшает коэффициент трения.

Образец AO20-1 показал более высокие значения коэффициента трения и износа, чем у образца Al-Zn-Sn. Результаты трибологических испытаний представлены на рис. 7.

Заключение

Показано, что олово проникает в объем сплава Al-Zn (40 % масс.) преимущественно по цинковым каналам и представляет собой в

межграничном пространстве алюминиевой фазы эвтектическую смесь состава Sn-Zn. Такое сочетание структурных составляющих в приповерхностном слое сплава Al-Zn-Sn уменьшает коэффициент трения.

Проведенные исследования на трибометре свидетельствуют о более высоком уровне антифрикционных свойств у сплава Al-Zn-Sn по сравнению со сплавом AO20-1.

Полученный композиционный материал Al-Zn-Sn может быть использован для изготовления антифрикционных вкладышей взамен классического сплава AO20-1.

Список литературы

1. Авраамов Ю.С., Кравченко А.Н., Кравченко И.А., Шляпин А.Д. Механические и антифрикционные свойства сплавов Fe-Cu-Pb-Sn-Zn, полученных методом

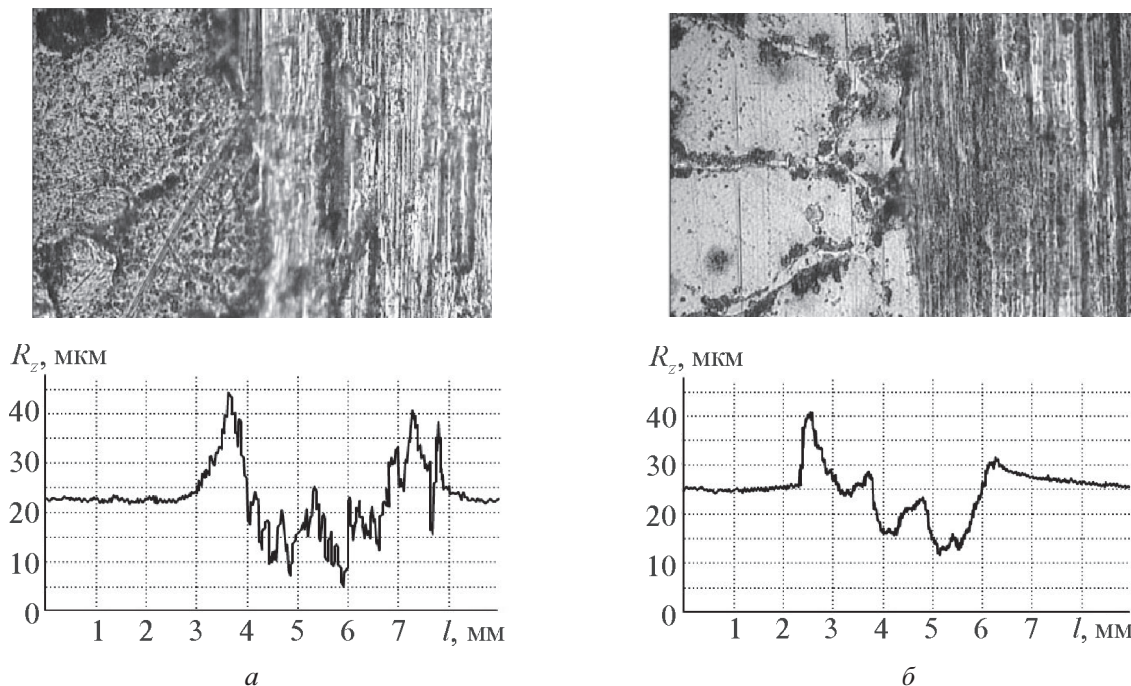


Рис. 6. Микроструктуры и профилограммы поверхностей образцов после трибологических испытаний:

a – AO20-1; b – Al-Zn-Sn

(R_z – высота неровностей профиля; l – базовая длина профиля)

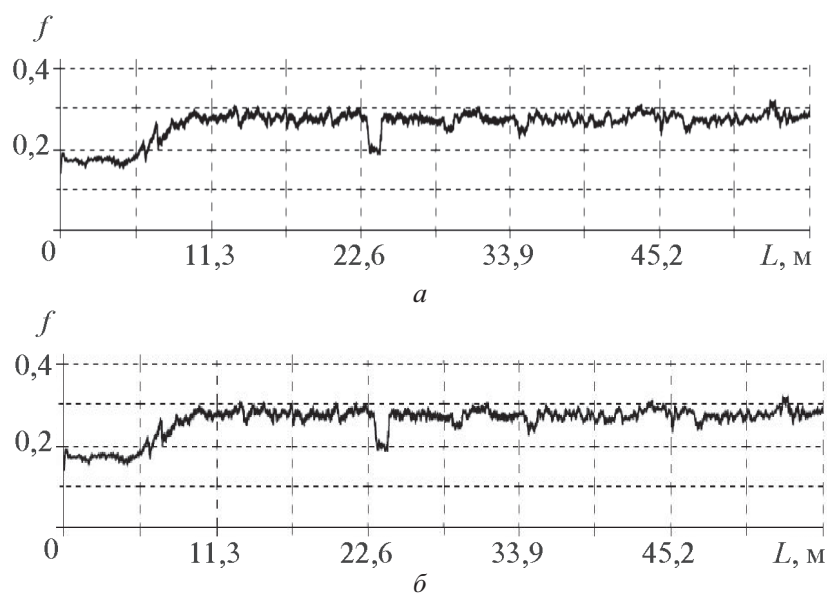


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения f от пути L для сплавов АО20-1 (а) и Al-Zn-Sn (б)

контактного легирования // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 4. С. 47–51.

2. Авраамов Ю.С., Кравченкова И.А., Шляпин А.Д. Новые антифрикционные сплавы на основе алюминия // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 2. С. 85–88.
3. Авраамов Ю.С., Кравченков А.Н., Кравченкова И.А., Шляпин А.Д. Микроструктура и фазовый состав сплавов Fe-Cu-Pb-Sn-Zn, полученных методом контактного легирования // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 4. С. 52–55.
4. Савицкий А.П., Вагнер М.И., Shin S.-K., Jo Y.-G. Подшипники скольжения на основе алюминия // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 3. С. 78–88.
5. Чернышева Т.А., Курганова Ю.А., Кобелева Л.И. и др. Композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов, упрочненных частицами, для пар трения скольжения // Конструкции из композиционных материалов. 2007. № 3. С. 38–48.
6. Авраамов Ю.С., Кравченкова И.А., Кравченков А.Н. и др. Способ получения антифрикционного сплава Al-Zn-Sn // Машиностроение и инженерное образование. 2012. № 1. С. 7–10.

Материал поступил в редакцию 06.10.13

**БАРАНОВ
Станислав Игоревич**

E-mail: stas88@list.ru
Тел.: (495) 276-33-24

Аспирант Московского государственного индустриального университета (МГИУ). Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы.

**БАЁВ
Лев Николаевич**

E-mail: lion777_77@inbox.ru
Тел.: (495) 276-33-24

Аспирант МГИУ. Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы.

**КРАВЧЕНКОВА
Ирина Александровна**

E-mail: iri540@yandex.ru
Тел.: (495) 783-88-12

Заместитель директора представительства по металлографии фирмы «Месс + ТесТ ГмбХ». Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы. Автор шести научных статей.

**КРАВЧЕНКОВ
Антон Николаевич**

E-mail:
akravchenkov64@yandex.ru
Тел.: (495) 276-33-24

Кандидат технических наук, доцент, начальник НИУ МГИУ. Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы. Автор 12 научных статей.

**МИХАЙЛЮК
Сергей Владимирович**

E-mail:
sergeymikhaylyuk@hotmail.com
Тел.: (495) 276-33-24

Аспирант МГИУ. Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы.

**ШЛЯПИН
Анатолий Дмитриевич**

E-mail: ashliapin@list.ru
Тел.: (495) 276-34-49

Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе МГИУ, заслуженный работник высшей школы РФ. Специалист в области металловедения, физики металлов и композиционных материалов. Автор более 150 научных работ, семи монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.