

2. Выявлена линейная зависимость значений толщины осажденной пленки SiO₂ на механокомпозит состава TiAl от времени магнетронного напыления при постоянных значениях скорости.
3. Определено рациональное время плакирования механокомпозитов состава TiAl – 40 минут, в результате которого толщина осажденной пленки SiO₂ составляет 5,2 мкм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Задание № ФЗММ-2020-0002).

Список используемых источников:

1. Рогов, А.В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации [Текст] / А.В. Рогов, Ю.В. Капустин, Ю.В. Мартыненко // ЖТФ. - 2015. - Том 85, вып. 2. - С. 126 - 134.
2. Каменева, А.Л., Зависимость морфологии, свойств, теплового и напряженного состояния пленок от технологических параметров магнетронного распыления [Текст] / А.Л. Каменева, Н.И. Сушенцов, А. Клочков // Технология металлов. - 2010. - № 11. С. 38-42.
3. Каменева, А.Л., Эволюция представлений о структурных зонах пленок, формируемых методами вакуумных технологий [Текст] / А.Л. Каменева // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. - 2011. - № 4. С. 41-48.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ТИПА ТВЁРДЫХ ДОБАВОК В СПЛАВ AL-SN

Н.М. Русин^а, к.т.н., с.н.с., А.Л. Скоренцев^б, к.т.н., н.с.

Институт физики прочности и материаловедения

Сибирского отделения Российской академии наук

634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4; тел. (3822)-28-69-62

E-mail: ^аrusinnm@mail.ru; ^бskoralexan@mail.ru

Аннотация: В работе исследовано влияние твердых добавок на трибо-механические свойства спеченного антифрикционного композита Al-Sn, содержащего большое количество мягкой оловянной фазы. Установлено, что добавление частиц кремния или алюминидов железа в исследуемый композит улучшает его механические свойства, а также износостойкость при сухом трении по стали. Для повышения износостойкости таких материалов следует минимизировать число адгезионных границ между оловянными частицами и твёрдыми добавками.

Abstract: An effect of hard additives on the tribo-mechanical properties of a sintered antifriction Al-Sn composite containing a large amount of soft tin phase was investigated. It was found that the addition of silicon or iron aluminides particles in the investigated composite improves its mechanical properties and wear resistance under dry friction against steel. In order to increase the wear resistance of such materials, the number of the adhesive boundaries between tin particles and hard additives should be minimized.

Ключевые слова: алюминиевые композиты, жидкофазное спекание, сухое трение, интенсивность изнашивания.

Keyword: aluminum-based composites, liquid phase sintering, dry friction, wear intensity.

Введение. Добавки олова в алюминий снижают интенсивность его адгезионного изнашивания при сухом и граничном трении за счёт повышения давления схватывания [1]. Однако концентрацию вводимого олова вынуждено ограничивают, поскольку при этом снижаются не только прочность и твёрдость сплава, но и его технологичность из-за преждевременной локализации пластического течения в образующей оловом межзёрненной сетке [2]. С целью повышения несущей способности и износостойкости сплавов Al-Sn можно вводить частицы или волокна различных твёрдых веществ [3], но жидкое олово, как правило, плохо их смачивает, и при кристаллизации образует с ними слабые адгезионные границы.

В принципе, в качестве твёрдой антизадириной смазки алюминия можно использовать, например, графит, сульфидные соединения и другие вещества с низким сопротивлением сдвигу [4]. К сожалению, такие вещества трудно совместимы с алюминием – он их плохо смачивает, а если удастся улучшить их смачиваемость, то на границе фаз возникают слои из хрупких продуктов взаимодействия, снижающие механические свойства композитов.

По указанным причинам при создании композитов гибридного состава объёмную долю твёрдых и мягких фаз вынужденно ограничивают, что не позволяет им проявить свои антифрикционные свойства в полной мере. Поэтому поиск совместимых веществ, совместное добавление которых в алюминиевую матрицу улучшит её триботехнические свойства, ведётся постоянно.

Например, твёрдые алюминиды предельного состава частично растворимы в алюминии, поэтому хорошо им смачиваются, но не образуют промежуточных хрупких фаз. То же можно сказать и о кремнии. Поэтому добавки данных веществ не вызывают катастрофического снижения технологических свойств алюминия и могут быть внесены в матрицу в больших количествах [5, 6]. Алюминиды также могут частично растворяться при повышенных температурах в олове и, следовательно, хорошо им смачиваются. Другое дело, что равномерно разместить большое количество твёрдых частиц в объёме отливки затруднительно из-за резкого повышения вязкости расплава. Эту проблему можно решить, если использовать при получении композиционных материалов (КМ) методы порошковой металлургии, позволяющей равномерно распределить ингредиенты сплава ещё на стадии формирования смеси [7].

Целью настоящей работы являлась проверка эффективности добавок твёрдых частиц алюминидов и кремния в композит Al-Sn, содержащий большое количество олова.

Материалы и методика эксперимента. Для получения композитов гибридного состава были приготовлены 2 порошковые смеси. Одну составляли порошки олова в количестве 40% по весу и распылённые в инертной атмосфере порошки силумина Al-12Si, далее – (КМ40-12). Другая смесь, обозначенная как КМ40-7, содержала тоже количество порошков олова марки ПО 2, но вместо силумина к ним были добавлены порошки элементарного железа марки ПЖ-4 (7%) и порошки элементарного алюминия марки АСД-4. Прессовки из смесей спекались в вакуумной печи при остаточном давлении газов не выше 10⁻² Па, а выдержка при заданной температуре составляла 1 час. Спечённые образцы подвергались доуплотнению в закрытой пресс-форме при 250 °С и давлении около 300 МПа.

Из полученных заготовок вырезались образцы прямоугольной формы для испытаний на сжатие и износостойкость при сухом трении. Механические испытания проводили на машине Walter+ Bai AG LFM-125 со скоростью осадки 0,5 мм/мин. Тест на трибологические свойства проводили по схеме «палец-диск» на триботестере «Tribotechnic» (France), имеющей встроенный компьютер для расчёта скорости скольжения и величины коэффициента трения. Образцы были прямоугольной формы с торцевой поверхностью трения 2x2 мм. В качестве контртела использовался диск диаметром 50 мм, изготовленный из малоуглеродистой стали, закалённой до твёрдости 47-50 HRC. Путь трения для всех испытаний составлял 1000 м.

Шлифы для металлографических исследований готовили по обычной методике, контрастное травление их поверхности осуществляли в 4-х процентном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследование структуры осуществляли с помощью предоставленных ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН (ЦКП ТНЦ СО РАН) оптического AXIOVERT-200MAT (Zeiss, Германия) и сканирующего электронного LEO EVO 50 (Карл Цейс, Германия) микроскопов.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведена структура спечённых при 570 °С КМ40-12 и КМ40-7. Видно, что в результате спекания порошки силумина подверглись перекристаллизации через жидкую оловянную фазу. В результате частицы кремния (серого цвета) из объёма порошинок перешли на межзёрненные границы и оказались частично окружёнными находящейся здесь оловянной фазой (рис.1а). В случае смеси КМ40-7 олово также образовывало с алюминием низкотемпературную эвтектику, расплав которой распространялся по поверхности порошинок алюминия. Достигнув частиц железа, жидкость хорошо их смачивает и обволакивает. Эта жидкость эвтектического состава является поверхностно-активной по отношению к частицам железа. Проникая по границам зёрен, она разваливает порошинки на мелкие фрагменты и облегчает взаимодействие их с алюминием, содержащимся в расплаве. В результате на месте частиц железа образуются кластеры из мелких алюминидов железа (серого цвета), разделённых оловянными прослойками (рис.1б).

Алюминий с кремнием образуют эвтектику с температурой плавления 577 °С, и во избежание потери прессовкой заданной формы из-за большого количества жидкой фазы нагревать смесь КМ40-12 при спекании выше данной температуры нельзя. Поэтому устранение остаточной пористости в образцах возможно только за счёт их механического уплотнения. В смеси КМ40-7 образуется большое количество мелких тугоплавких частиц, способных сохранить форму прессовки даже при расплавлении алюминиевой матрицы. Это позволило нагревать спекаемую смесь до 710 °С, но даже в этом случае от остаточной пористости не удалось избавиться, и спечённые образцы также подвергались доуплотнению в закрытой пресс-форме.

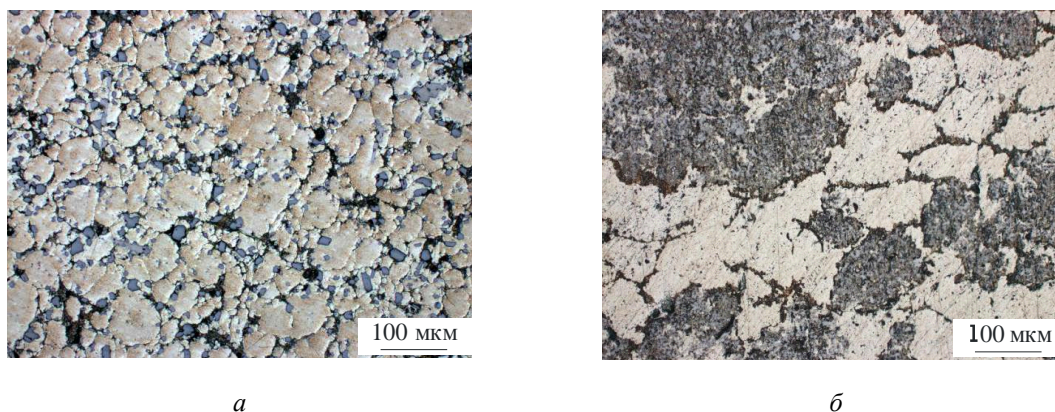


Рис. 1. Микроструктура спечённых при 570 °С в течение часа KM40-12 (а) и KM40-7 (б)

Пластичность образцов после такой обработки давлением значительно возросла, и они приобрели возможность к большему деформационному упрочнению, как это следует из Табл. 1. В результате прочность композитов была выше, чем у полученного также спеканием KM Al-40Sn. Максимальная прочность KM40-7 была выше, чем у остальных композитов из-за большей объёмной доли твёрдых частиц, которые при сжатии образца могли упираться друг в друга. Однако оловянное их окружение не позволяло сохранять таким контактам длительное время, и смещение частиц сопровождалось уменьшением действующего напряжения. В любом случае легирование сплава Al-Sn способствовало существенному его упрочнению.

Таблица 1

Результаты трибо-механических испытаний спечённых образцов (Al-Me)-40Sn после допрессовки (ГП) при 250 °С. Скорость скольжения – 0,6 м/с

Состав КМ	Тип обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Интенсивность изнашивания, мкм/м		
				1 МПа	3 МПа	5 МПа
(Al-12Si)-40Sn	570 °С+ГП	91	117	0,12	0,16	0,20
Al-40Sn	600 °С+ГП	58	85	0,13	0,20	0,25
Al-7Fe-40Sn	710 °С+ГП	102	122	0,12	0,17	0,22

На рис. 2 показана поверхность трения композиционных образцов с кремнием и железом. Видно, что у композита с кремнием она испытывала некоторую сдвиговую деформацию, и с задней её стороны образовался заусенец (рис. 2а). Пластический сдвиг приводит к утонению зёрен в деформируемом верхнем слое и их отслоению в виде частиц износа. На месте отслоившихся зёрен остаются углубления. То есть, несущая поверхность образца сокращается. В режиме стационарного трения устанавливается динамическое равновесие между площадью, занимаемой углублениями и площадью цельной поверхности. Отслоившиеся зёрна дополнительно разрушаются между трущимися контртелами, и некоторая их часть переносится на поверхность дорожки трения, образуя неровности, которые собственно и деформируют поверхность образца (рис. 3). Видно, что оставляемые ими канавки неглубокие и имеют пологие края. Следов схватывания на дне канавок не наблюдается (рис. 2б).

Изнашивание поверхности образцов KM40-7 осуществляется аналогично, как можно видеть на рис. 2в, г. Из их сравнения следует, что если спечённый образец не подвергать допрессовке, то частицы износа образуются при меньшей испытанной поверхностным слоем деформации. Соответственно, ямки на месте образующихся частиц износа глубже (рис. 2в).

В процессе деформации верхний слой композиционных образцов с твёрдыми частицами упрочняется сильнее, чем у двухфазного композита Al-40Sn (Табл. 1). Глубина вдавливания неровностей дорожки трения уменьшается, и интенсивность пластического сдвига, а с ним и изнашивания композитов, снижается. Из приведённых в Табл. 1 данных, видно, что добавки и кремния и железа способствуют повышению износостойкости базового композита Al-40Sn. Причём легирование кремнием оказывается более эффективным, чем железом, несмотря на большую твёрдость KM40-7. Это обусловлено тем, что твёрдые частицы алюминидов располагаются в форме

кластеров в окружении оловянной фазы, которая не упрочняется и удерживает твёрдые частицы не так прочно, как алюминиевая матрица. Они меньше сопротивляются локализации деформации в поверхностном слое, и частицы износа образуются после прохождения меньшего числа твёрдых деформирующих неровностей, сидящих на поверхности дорожки трения (рис. 3).

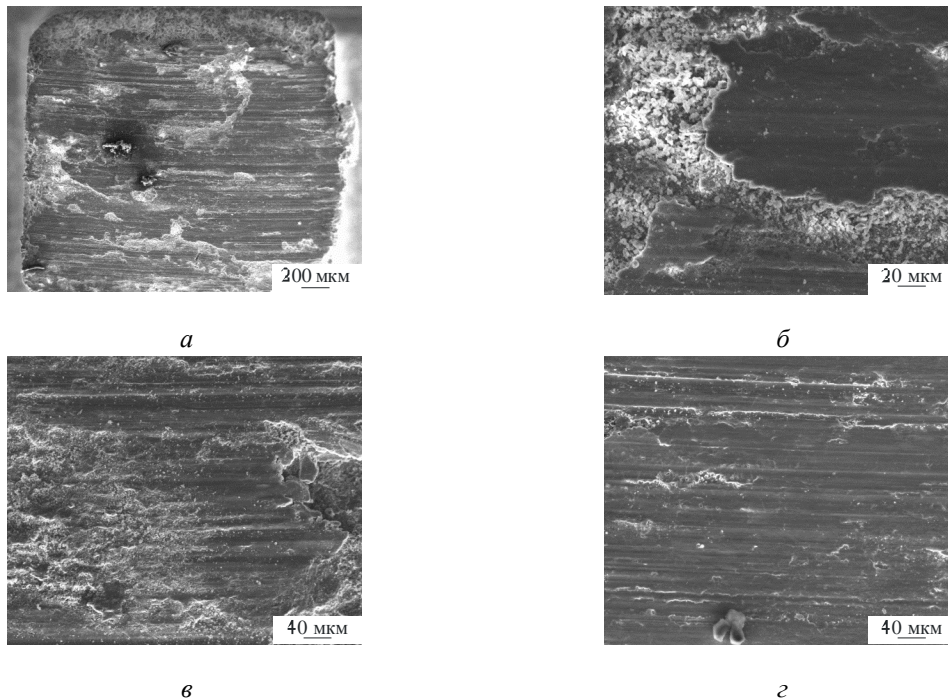


Рис. 2. Поверхность трения KM40-12 (570 °C+ГП) (а, б), а также KM40-7 спечённого (710 °C) в – и допрессованного (710 °C+ГП) г – образцов. Скорость скольжения – 0,6 м/с, Давление – 5 МПа

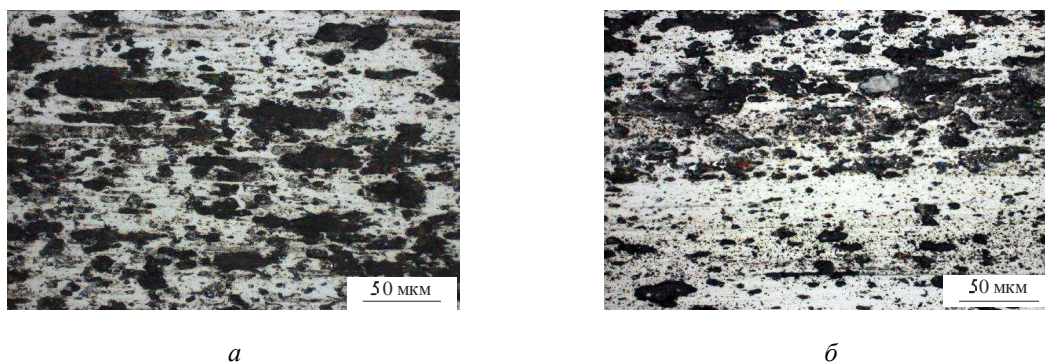


Рис. 3. Изображение поверхности дорожки трения на стальном контртеле после фрикционного взаимодействия с KM40-12 (570 °C+ГП) а – и KM40-7(710 °C+ГП) б – образцами. Скорость скольжения – 0,6 м/с, Давление – 5 МПа

Выводы. Из полученных результатов следует, что:

- добавление смачиваемых оловом и алюминием твёрдых частиц кремния или алюминидов железа в композиционный сплав Al-40Sn улучшает его сопротивление изнашиванию при сухом трении;
- для повышения износостойкости таких композитов следует минимизировать число адгезионных границ между оловянной фазой и твёрдыми добавками.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0006.

Список используемых источников:

1. Миронов А.Е., Белов Н.А., Столярова О.О. Аллюминиевые сплавы антифрикционного назначения. М.: Изд. дом МИСиС, 2016, 222 с.
2. Rusin N.M., Skorentsev A.L., Kolubaev E.A. Effect of equal channel angular pressing on mechanical and tribological properties of sintered Al-Sn composites // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020. V. 29(3). P. 1955-1963.
3. Vencel A., Bobic I., Jovanovic M.T., Bobic M., Mitrovic S. Microstructural and tribological properties of A356 Al-Si alloy reinforced with Al₂O₃ particles // Tribology Letters. 2008. V. 32. P. 159-170.
4. Asif M., Chandra K., Misra P.S. Development of aluminium based hybrid metal matrix composites for heavy duty applications. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2011. V. 10. N 14. P. 1337-1344.
5. Goudar D.M., Srivastava V.C., Rudrakshi G.B., Raju K., Ojha S.N. Effect of tin on the wear properties of spray formed Al-17Si alloy // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015. V. 68(1). P. 3-7.
6. Русин Н.М., Савицкий А.П., Тушинский Л.И., Попелюх А.И. Механические и триботехнические свойства спечённых сплавов системы алюминий-железо // Перспективные материалы. 1998. N 4. С. 42-49.
7. Kostornov A.G., Fushchich O.I. Sintered antifriction materials // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2007. V. 46. N 9-10. P. 503-512.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО И ВИБРОПЛАСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛЫ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ

В.И. Сташенко¹, к.ф.-м.н., О.Б. Скворцов^{1,2}, к.т.н., О.А. Троицкий¹, д.т.н., профессор

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия,

101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4, тел. (499)135-81-20

²Научно-технический центр «Завод балансировочных машин», Россия,

115230, Москва, Варшавское шоссе, 46, тел. (495)120-03-18 доб.152

E-mail: vis20-11@rambler.ru

Аннотация: Представлены экспериментальные результаты исследования генерации вибрационного отклика в проводниках на воздействие внешнего электрического импульса. Влияние вибрационных процессов на механические свойства материалов проводника проявляется как электропластический и вибропластический эффекты. Отмечены такие особенности вибрационного отклика как формирование ударных возмущений в моменты начала переднего и заднего фронта внешнего электрического импульса, зависимость от полярности, линейная зависимость от амплитуды воздействия, возбуждение затухающих вибраций.

Abstract: A list of experimental results of studying the generation of a vibration response in conductors to the effect of an external electric pulse is presented. The influence of vibration processes on the mechanical properties of conductor materials is manifested as electroplastic and vibroplastic effects. Such features of the vibration response as the formation of shock disturbances at the moments of the beginning of the leading and trailing edges of an external electric pulse, dependence on polarity, linear dependence on the amplitude of the impact, and excitation of damped vibrations are noted.

Ключевые слова: электрический импульс, магнитное поле, удар, деформация, вибрация, ускорение, релаксация, изгиб.

Keyword: electric impulse, magnetic field, shock, deformation, vibration, acceleration, relaxation, bending.

Введение

В условиях воздействия токов высокой плотности в одиночном проводнике, даже если он выполнен из немагнитного материала, формируется сильное магнитное поле. Такое поле, как установлено экспериментально [1], оказывает заметное влияние на механические свойства материала проводника, например, влияет на его усталостную прочность. Практическим примером использования динамических сил, возникающих при пропускании электрического импульса через проводник, является магнитно-импульсная сварка. Такая сварка использует механические силы, действующие на свариваемые проводники в переменном магнитном поле создаваемом индуктором, через который пропускают разрядный ток конденсаторной батареи. При этом в качестве индуктора может исполь-