

Влияние электрического тока и фазового состава на износ композита, содержащего переработанную сталь ШХ15

В. В. Фадин, М. И. Алеутдинова, А. Г. Мельников

Определена износостойкость горячепрессованных модельных металлических композитов на основе переработанной стали ШХ15 при трении в условиях скользящего электроконтакта. Показано, что композиты с фазовым составом медь + графит + сталь ШХ15 и медь + графит + титан + сталь ШХ15 не способны к износостойкому скользящему электроконтакту. Введение свинца или никеля в первичную горячепрессованную структуру вместо титана приводит к реализации относительно высоких износостойкости и электропроводности зоны трения.

Ключевые слова: порошковый композит, горячее прессование, токопроводящий материал, скользящий электрический контакт, износ.

Wear rate of hot pressing model metallic composites based on ball bearing wastes steel has been determined at friction under sliding electric contact conditions. It has been shown that composites having phase composition copper + graphite + ball bearing steel and copper + graphite + titanium + ball bearing steel unable to wear-resistant sliding electric contact. Lead or nickel introduction instead of titanium in hot pressing structure results in realization of relatively high both wear resistance and electric conductivity of the friction zone.

Key words: powder composite, hot pressing, current collection material, sliding electric contact, wear.

Введение

Энергия, введённая в трибосистему, вызывает появление вторичных структур (ВС), от свойств которых зависит её работоспособность [1, 2]. Трибосистема с токоёмом будет иметь высокую работоспособность при условии, что ВС обладают высокой сдвиговой неустойчивостью для обеспечения малого коэффициента трения, а также высокой пластичностью, хорошей способностью удерживаться в зоне трения, высокой электропроводностью. Критериями работоспособности могут служить износостойкость и электропроводность зоны трения в условиях скользящего электроконтакта. Известные материалы для скользящих электроконтактов работоспособны без смазки, как правило, при плотности тока до 50 А/см². Эксплуатация скользящих электроконтактов с более высокой плотностью тока не проводится вследствие отсутствия соответствующих материалов. Однако создание материалов, реализующих длительный скользящий электроконтакт при повышенной плот-

ности тока без смазки, представляет научный интерес. Относительно высокую износостойкость без смазки при более высокой плотности тока проявляет модельный композит на основе переработанной стали ШХ15 вследствие формирования ВС, достаточно пластичных в пятне контакта [3,4]. Этот композит может служить перспективной основой для создания скользящих электроконтактов, работоспособных при высокой плотности тока и отсутствии смазки. Возможный вариант улучшения свойств основы — уменьшение пористости исходной структуры, что должно привести к увеличению электропроводности и износостойкости зоны трения. Одним из способов получения материалов, имеющих низкую пористость, является горячее изостатическое прессование. Поэтому целесообразно определить износостойкость композитов на основе переработанной стали ШХ15, полученных методом горячего прессования, в сравнении с износостойкостью известного спечённого композита [3, 4]. Кроме того, износостойкость и электропроводность зоны трения

зависят от фазового состава. Фазовый состав можно изменять путём введения частиц различных металлов. Можно предполагать, что попадая в зону трения, эти металлы будут действовать как легирующие элементы поверхностных слоёв и влиять на свойства ВС, то есть на свойства узла трения. Предсказание этих свойств, исходя из знания фазового состава и свойств исходной структуры, невозможно, и целесообразно экспериментально изучить влияние легирующих элементов на характеристики зоны трения.

Износостойкость часто растёт при увеличении твёрдости поверхности трения и/или увеличении площади фактического контакта. Не исключено, что эти характеристики можно увеличить путём введения легирующих металлов в первичную структуру. Известно, что никель, растворяясь в стали, приводит к увеличению твёрдости. Кроме того, никель не изменяет вязкость стали [5], что может способствовать пластической деформации зоны трения и формированию относительно большой площади фактического контакта. Поэтому определение влияния никеля на износостойкость композиции, содержащей переработанную сталь ШХ15, представляет научный интерес. Известно также, что свинец, присутствуя в триботехническом материале, формирует пластичные ВС на своей основе [2], поэтому целесообразно рассмотреть его влияние на свойства композиции, имеющей основу из переработанной стали ШХ15. Представляет интерес также увеличить твёрдость поверхности трения путём введения в первичную структуру карбидообразующего элемента, например, титана.

Цель работы — изучение влияния титана, или свинца, или никеля на работоспособность горяче-прессованных композитов с основой из переработанной стали ШХ15 в условиях скользящего токосъёма без смазки.

Материалы и методика исследования

Шихта для изготовления композитов имела фазовый состав, об. %: Cu + 10% графит + 10% Me +

+ 60% ШХ15, где Me — Ti, или Pb, или Ni; ШХ15 — сталь ШХ15, переработанная из шлифовального шлама по методике [6]. Композит 1 — Cu + 10% графит + 70% ШХ15 (таблица) получен спеканием в вакууме при температуре 1100°C в течение 2 ч. Горячее прессование проведено в графитовой прессформе при температуре 1130°C и давлении 37 МПа в течение 20 мин в вакууме с остаточным давлением 14 Па.

Предел прочности при изгибе определен на испытательной машине Instron-1185. Удельное электросопротивление композитов определено методом амперметра-вольтметра. Пористость измерена методом гидростатического взвешивания на аналитических весах. Микротвёрдость измерена на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Рентгеновское исследование проведено на дифрактометре ДРОН-7 (ЦКП ИФПМ СО РАН) в излучении кобальта со скоростью съёмки 1 град./мин.

Триботехнические испытания проведены на машине трения СМТ-1 в условиях скользящего токосъёма без смазки со скоростью скольжения 5 м/с при давлении 0,13 МПа по схеме нагружения “вал — колодка” [7]. Путь трения составлял не менее 9 км. Протекание электротока через трибоконтакт обеспечено подачей переменного напряжения (50 Гц). Контактная плотность тока определена как отношение силы тока к номинальной площади трибоконтакта. Линейную интенсивность изнашивания I_h определяли как отношение изменения высоты образца к пути трения.

Результаты и обсуждение

Порошок переработанной стали ШХ15 обладает невысокой способностью к прессованию, и после спекания композит имеет относительно высокую пористость (таблица, композит 1). Уменьшение пористости первичной структуры должно приводить, в общем случае, к увеличению удельной электропроводности и твёрдости материала. Из таблицы видно, что горячее прессование шихты, аналогичной

Таблица

Физические и механические свойства спеченных композитов

Состав, об. %	Свойства спеченных композитов					
	$H_{ц}$, МПа	Π , %	ρ , мкОм·м	a , Å	ϵ	D , нм
1. Cu + 10% Гр + 70% ШХ15 (спек)	3580	12	0,24	2,8665	0,0021	21,8
2. Cu + 10% Гр + 70% ШХ15 (ГП)	3784	15	0,46	2,8655	0,0019	21,8
3. Cu + 10% Ti + 10% Гр + 60% ШХ15	7706	16	1,18	2,8653	0,0033	13,1
4. Cu + 10% Pb + 10% Гр + 60% ШХ15	2967	21	0,32	2,8699	0,0035	23,3
5. Cu + 10% Ni + 10% Гр + 60% ШХ15	4487	7	0,75	2,8741	0,0025	21,7

Гр — графит, ГП — горячее прессование.

по фазовому составу композиту 1, приводит к получению материала (композит 2), имеющего более высокие микротвёрдость H_{μ} , пористость P и удельное электросопротивление ρ в сравнении с композитом 1. Частица переработанной стали ШХ15 имеет пористую структуру, и увеличение микротвёрдости частицы стали ШХ15 в композите 2 может произойти вследствие уменьшения её пористости. Но межчастичная пористость при этом остаётся достаточно высокой вследствие вероятной невысокой пластичности границы частицы стали ШХ15, поэтому суммарная пористость горячепрессованного композита 2 выше пористости спечённого композита 1. При этом удельное электросопротивление композита 2 (таблица) заметно выше удельного электросопротивления композита 1, что можно также объяснить слабым межфазным взаимодействием вследствие малого времени прессования. Не исключено, что при увеличении времени горячего прессования химические связи на межфазных границах усилятся, и общая пористость и удельное электросопротивление станут ниже, но это время может быть сравнимым со временем спекания, а потому технологически непродуктивно. Различие способов получения композитов 1 и 2 особенно заметно при рассмотрении электропроводности и износостойкости зоны трения, которые являются основными критериями работоспособности. На рис. 1а видно, что электропроводность зоны трения композита 2 заметно ниже, чем эта же характеристика композита 1. Более наглядно это различие представлено на рис. 1б сравнением электросопротивления единичной номинальной площади контакта. Высокое электросопротивление зоны трения композита 2 вызвано малой площадью фактического контакта, обусловленного высокой микротвёрдостью частицы стали и невысокой пластичностью ВС. В этом случае возникает большая локальная плотность тока на пятнах фактического контакта, что активирует адгезию. Предполагая, что химическая связь на межфазных границах слаба, можно ожидать их быстрое разрушение в зоне трения и повышенную интенсивность изнашивания при условии действия адгезии. Износостойкость следует считать определяющим критерием работоспособности. Допустимым значением интенсивности изнашивания можно принять 1 мкм/км [8]. На рис. 1, в видно, что катастрофическое изнашивание композита 2 реализуется при плотности тока около 50 А/см² (рис. 1, в) вследствие вероятного действия адгезии. Не исключено, что причиной может быть также различие фазового состава. Рентгеновский фазовый анализ показал, что перлитная структура стальных частиц спечённого композита 1 и горячепрессованного

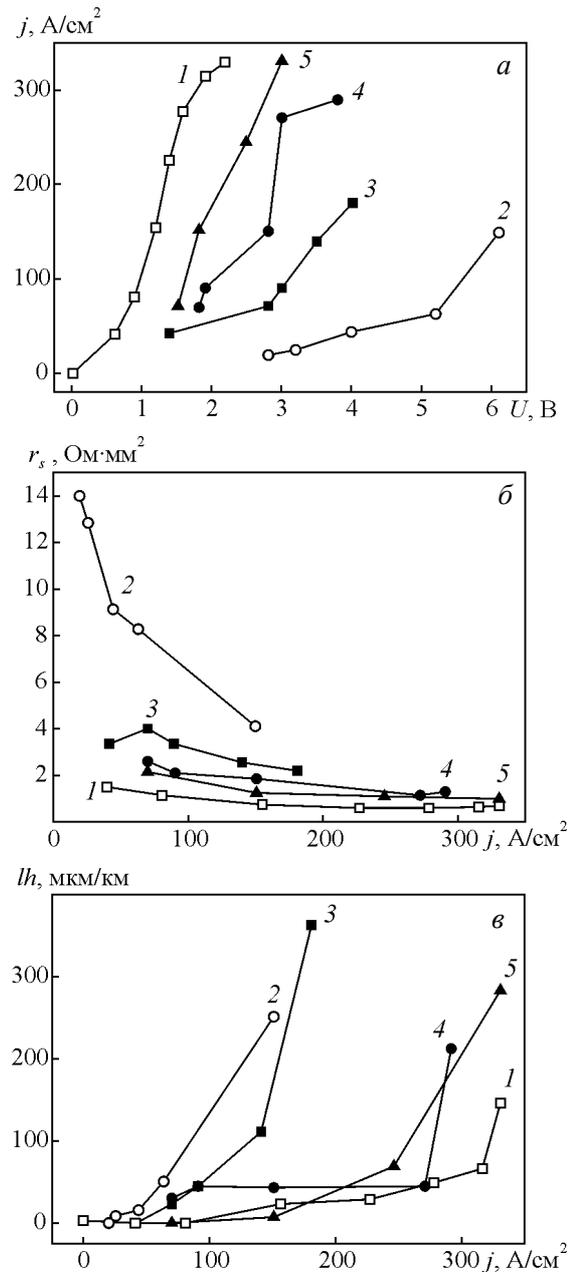


Рис. 1. Вольтамперная характеристика (а), электросопротивление единицы номинальной площади контакта (б) и интенсивность изнашивания зоны трения композитов на основе переработанной стали ШХ15 в зависимости от контактной плотности тока (в). 1 – композит 1, 2 – композит 2, 3 – композит 3, 4 – композит 4, 5 – композит 5.

композита 2 проявляет рефлексы цементита Fe_3C , имеющие индексы (121), (131). Более сильные рефлексы цементита (211), (102), (220), (031) и (112) расположены в углах, близких к углам рефлекса меди (111) и рефлекса железа (110). Их разделение с целью определения содержания цементита является трудо-

ёмкой и нецелесообразной задачей. Параметр решётки a стали ШХ15, микродеформация ϵ и область когерентного рассеяния D композитов 1 и 2 практически не различаются (таблица). Поэтому можно утверждать, что свойства материалов на основе стали ШХ15 с одинаковым фазовым составом, отличаются от свойств зоны трения не из-за различий атомной структуры стали ШХ15, а вероятно — из-за структуры порового пространства, формирующегося при разных способах получения композита. Видно, что уменьшение пористости и увеличение работоспособности композитов на основе переработанной стали ШХ15 не достигается горячим прессованием в течение 20 мин.

Введение титана в первичную структуру не уменьшает пористость, но существенно увеличивает микротвёрдость частиц стали ШХ15 и удельное электросопротивление горячепрессованной композиции 3 в сравнении с этими же свойствами композитов 1 и 2 (таблица). Это вызвано тем, что титан в первичной структуре образовал химические соединения. На рентгенограмме титан в свободном виде отсутствует, а сама рентгенограмма имеет сложный вид. Наблюдается значительное увеличение рефлекса меди (111) вследствие наложения на него рефлексов фаз, возникших в процессе горячего прессования. Кроме того, на рентгенограмме присутствует несколько слабоинтенсивных пиков, которые не являются отражениями от чистых компонентов, что также указывает на образование в небольших количествах химических соединений на основе Ti – C, Ti – Fe, Ti – Cu. Образование фаз с повышенной твёрдостью препятствует получению низких значений пористости и удельного электросопротивления (таблица). Параметр решётки стали ШХ15 после горячего прессования имеет значение, типичное для порошков переработанной стали, что указывает на отсутствие титана в её решетке. Область когерентного рассеяния композита 3 имеет относительно низкое значение, что может быть связано с наличием соединений титана в структуре стали. При этом увеличиваются микрорискажения ϵ (таблица). Высокие микротвёрдость и удельное электросопротивление композита 3 являются причиной формирования зоны трения с высокими электросопротивлением и интенсивностью изнашивания (рис. 1). Но присутствие титана в зоне трения приводит к более низкому электросопротивлению единичной площади контакта (рис. 1б) вследствие некоторого повышения коррозионной стойкости. Образование химических соединений титана в течение короткого времени горячего прессования позволяет утверждать, что при более длительной выдержке, характерной для спекания,

также будут появляться соединения титана. Поэтому следует ожидать, что присутствие титана в порошковой шихте не позволит получить работоспособный токосъёмный композит независимо от применяемой технологии.

Свинец служит антифрикционной структурной составляющей в триботехнических материалах, но при высокой температуре быстро испаряется, поэтому его присутствие в шихте композита при спекании ведёт к ослаблению межчастичного взаимодействия и повышению пористости. В настоящей работе предположено, что горячее прессование в замкнутом объёме способно подавить интенсивное испарение свинца и можно получить вполне работоспособный и компактный материал. Из таблицы видно, что композит 4 имеет относительно высокую пористость. Это связано с тем, что свинец не растворяется в стали и меди и не упрочняет структуру композита 4. Кроме того, высокая пористость может указывать на то, что давление паров свинца в процессе горячего прессования заметно препятствует консолидации частиц стали и меди. Низкая микротвёрдость может быть обусловлена тем, что в присутствии расплава и паров свинца затруднено уплотнение пористой структуры частицы стали. Однако низкая микротвёрдость и высокая пористость композита 4 допускают получение удельного электросопротивления на уровне удельного электросопротивления чистого свинца. Это указывает на равномерное распределение свинца в объёме композита. Микроискажения и параметр решётки стали в композите 4 имеют относительно высокие значения (таблица), что не имеет объяснения на основе представленных данных и требует отдельного изучения. Зона трения имеет относительно невысокие электросопротивление и интенсивность изнашивания. Это обусловлено тем, что свинец находится в композите 4 в свободном состоянии после горячего прессования и на его основе формируются пластичные ВС. Поэтому образуется относительно большая площадь фактического электроконтакта, и контактная плотность тока, соответствующая режиму катастрофического изнашивания, имеет значение более 200 А/см² (рис. 1в). Этот результат свидетельствует о том, что свинец может увеличить работоспособность скользящего электроконтакта с повышенной плотностью тока, но его введение в композит методами спекания и горячего прессования неэффективно.

В токосъёмные материалы часто вводят никель [2]. Из таблицы видно, что горячее прессование шихты композита 5 формирует относительно низкую пористость. Высокие микротвёрдость и удельное

электросопротивление обусловлены растворением никеля в стали и меди, что подтверждается также на рентгенограмме отсутствием отражений никеля и повышенным значением параметра решётки стали (таблица). Микродеформация решётки и область когерентного рассеяния незначительно отличаются от этих же параметров композитов 1 и 2. Высокие микротвёрдость и удельное электросопротивление композита 5 позволяют формировать зону трения с невысокими электросопротивлением и интенсивностью изнашивания (рис. 1). Вполне возможно, что никель увеличивает вязкость материала зоны трения, а также увеличивает фактическую площадь контакта. Поэтому в этом скользящем электроконтакте интенсивность изнашивания не превышает 1 мкм/км при скольжении с плотностью тока до ~ 70 А/см². При этом катастрофическое изнашивание проявляется при плотности тока более 200 А/см².

Из приведённых результатов видно, что удельная электропроводность не зависит явно от параметров атомной структуры (то есть от ϵ , D и a), но зависит от пористости и фазового состава. Появление растворов или химических соединений может уменьшить пластичность прессуемого объёма, поэтому можно утверждать, что горячее прессование не всегда позволяет достигать низкую пористость в композитах на основе переработанной стали ШХ15. Высокая пористость, а также растворы и химические соединения, обуславливают высокое удельное электросопротивление. Известно, что для уменьшения электросопротивления зоны трения материал скользящего контакта и контртела должны иметь низкое удельное электросопротивление [9, 10]. Однако увеличение удельного электросопротивления композитов иногда незначительно увеличивает электросопротивление зоны контакта вследствие формирования относительно большой площади фактического контакта (например, композиты 4 и 5). Это позволяет предположить, что электросопротивление зоны трения уменьшается за счёт увеличения площади электроконтакта более эффективно, чем за счёт уменьшения удельного электросопротивления сопряжённых композитов. Кроме того, на рис. 1 видно, что композиты, формирующие зону трения с более высоким электросопротивлением, проявляют более высокую интенсивность изнашивания. При этом режим катастрофического изнашивания начинается при более низком значении плотности тока. Это указывает на то, что работоспособность скользящего электроконтакта зависит от электропроводности зоны трения в большей степени, чем от удельной электропроводности контактирующих материалов. Поэтому увеличение электропроводности зоны трения и

работоспособности вообще целесообразно проводить путём поиска элементов, увеличивающих площадь фактического электроконтакта. Для осуществления этого конструкция композита не должна содержать титан и, вероятно, другие карбидообразователи (молибден и др.), но вполне допустимо введение никеля и свинца в первичную структуру композита.

Заключение

Горячепрессованный композит на основе переработанной стали ШХ15 формирует непластичные ВС, что приводит к катастрофическому изнашиванию при плотности тока до 50 А/см². Титан, введённый в шихту с основой из переработанной стали ШХ15, после проведения горячего прессования остаётся в первичной структуре в химически связанном состоянии и также формирует непластичные ВС, что вызывает катастрофическое изнашивание при плотности тока около 50 А/см². Достижение низкой пористости композитов на основе переработанной стали ШХ15 в течение 20 минут горячего прессования возможно при введении никеля в порошковую шихту. Присутствие никеля в композите на основе переработанной стали ШХ15 приводит к формированию пластичных ВС, обеспечивающих удовлетворительную работоспособность при скольжении без смазки с плотностью тока до 70 А/см² и переходом к режиму катастрофического изнашивания при плотности тока более 200 А/см². Свинец, введённый в шихту, содержащую переработанную сталь ШХ15, существует как структурный элемент первичной структуры и обуславливает повышенную пористость, но вполне высокую износостойкость при скольжении с плотностью тока более 100 А/см².

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 09-08-00200-а проекта 3.6.1.2 программы 3.6.1 фундаментальных исследований СО РАН.

Литература

1. Тушинский Л.И. Оптимизация структуры для повышения износостойкости сплавов. Сб. научных трудов "Физика износостойкости поверхности металлов". Л.: ЛФТИ АН СССР, 1988, с. 42 – 55.
2. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спечённые антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980, 404 с.
3. Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Шляхова Г.В. Износостойкость стальных спеченных композитов в

- условиях скользящего токосъёма. Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, спец. выпуск, с. 193 – 196.
4. Фадин В.В., Алеутдинова М.И. Износостойкость скользящего электроконтакта, содержащего переработанную сталь ШХ15. Трение и износ, 2008, т. 29, № 5, с. 524 – 530.
 5. Мозберг Р.К. Материаловедение: Учебное пособие. 2 изд. М.: Высш.шк., 1991, 448 с.
 6. Колубаев А.В., Кочепасов И.И., Кузьмиченко В.М., Сизова О.В., Тарасов С.Ю., Фадин В.В. Спечённый антифрикционный материал на основе железа. Патент РФ №210380 6 С1, С22С 38/20, 1998. RU БИ №1, 10.01.98. с. 299.
 7. Фадин В.В., Алеутдинова М.И. Износостойкость стальных спечённых композитов в условиях скользящего токосъёма. Перспективные материалы, 2007, № 2, с. 69 – 74.
 8. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спечённые антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980, 404 с.
 9. Измайлов В.В., Узикова Т.И. О влиянии легкоплавких добавок на работу контакта щётка – коллектор. Трение и износ, 1983, т. 4, № 1, с. 104 – 111.
 10. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты: Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2008, 560 с.

Фадин Виктор Вениаминович — Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики прочности и физического материаловедения. E-mail aleut@ispms.tomsk.ru.

Алеутдинова Марина Ивановна — Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), кандидат технических наук, научный сотрудник. Специалист в области порошкового материаловедения. E-mail aleut@ispms.tomsk.ru.

Мельников Александр Григорьевич — Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физического материаловедения. E-mail aleut@ispms.tomsk.ru.