Износостойкость и электрические параметры зоны контакта металлических композитов при трении с повышенной плотностью тока

В. В. Фадин, М. И. Алеутдинова

Исследовано влияние контактной плотности тока на интенсивность изнашивания, электропроводность и плотность тока в пятне контакта металлических композитов при трении без смазки. Показано, что композиты, содержащие более 50% Cu, имеют низкие значения электропроводности и износостойкости зоны трения. Композиты, содержащие менее 50%Cu, формируют зону трения с относительно высокими электропроводностью и износостойкостью. Установлено, что основной контактный ток при трении без смазки с высокой плотностью тока протекает в виде электроразрядов в контактном пространстве.

Ключевые слова: скользящий электроконтакт, зона трения, токосъёмный композит, износостойкость, металлография поверхности трения, вторичные структуры, электропроводность контакта

Effect of contact current density on wear rate, electric conductance and current density in contact spot of metal composites at friction without lubricants is represented. It is shown low electric conductance and friction zone wear resistance of composites containing more 50%Cu. Composites containing less 50%Cu form friction zone having relatively high electric conductance and wear resistance. It is established the main current flows as electric charges in contact space at friction without lubricant in conditions of high current density.

Key words: sliding electric contact, friction zone, current collection composite, wear resistance, friction surface metallography, friction induced structures, contact electric conductance

Введение

Электропроводность и износостойкость являются основными критериями работоспособности скользящего электроконтакта. Электропроводность контакта увеличивается при применении материалов, имеющих низкое удельное электросопротивление. Такие материалы содержат много меди. Электропроводность увеличивается также в присутствии органических смазок. Однако применение смазки не всегда допустимо и изучение электропроводности зоны трения в условиях скользящего электроконтакта без смазки, представляет научный и практический интерес.

Плотность тока является основным разрушающим фактором зоны трения, поэтому одной из основных задач исследования в этом направлении является определение пределов работоспособности в зависимости от плотности тока, а также проведение поиска возможности её увеличения. Применяемые материалы для скользящего электроконтакта имеют удовлетворительную износостойкость без смазки при плотности тока менее 50 А/см^2. Увеличение плотности тока вызывает появление электроразрядов в зоне трения. В этих условиях токосъёмные материалы, содержащие медь, как правило, изнашиваются вследствие электроэрозии и адгезии к контртелу. Не исключено, что реализация скользящего электроконтакта при более высокой плотности тока возможна путём создания материалов на основе сталей. Нагружение материала трением и электрическим током вызывает структурные изменения поверхности контакта, что приводит к увеличению твёрдости и электрического сопротивления скользящего электроконтакта. Слой структурных изменений (вторичные структуры) определяет характер взаимодействия пары

трения и выходные характеристики трибосистемы [1, 2]. Реализация трения при повышенных значениях входных параметров (плотность тока, скорость скольжения, разреженность среды и т.п.) трибосистемы с токосъёмом является актуальной проблемой. Существующие материалы для работы в этих условиях не проявляют высокой износостойкости, что не позволяет увеличить электропроводность зоны контакта. Изменение фазового состава материалов пары трения не приводит к эффективному увеличению электропроводности зоны контакта при скольжении без смазки и при повышенной плотности тока (более 50 А/см^2)

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение изменения износостойкости и электрических параметров зоны трения композитов, содержащих сталь и медь, при скольжении с плотностью тока более 100 А/см^2 в отсутствие смазки.

Материалы и методика

Порошковые композиты имели состав по шихте (об.%): Cu + 10% Гр + 70% ШХ15 (композит 1), Cu + + 10% Гр + 40% ШХ15 (композит 2), где ШХ15 — подшипниковая сталь ШХ15, переработанная из шлифовального шлама подшипникового производства, Гр — графит. Образцы спекали в вакууме при температуре 1100°С в течение 2 часов. Удельное электросопротивление композитов определено методом амперметра-вольтметра. Предел прочности при изгибе определен на испытательной машине Instron-1185. Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе Neophot-21. Удельное электросопротивление композитов определено методом амперметра – вольтметра. Пористость оценена по результатам гидростатического взвешивания на аналитических весах.

Триботехнические испытания проведены в условиях скользящего токосъема без смазки при давлении 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1 с модернизированным креплением образца. Нагружение осуществлено по схеме “вал-колодка”. Путь трения составлял 9 км. Плотность тока j определена как отношение силы тока i к номинальной площади трибоконтакта A_a.

Свойства модельных композитов представлены в сравнении с такими же свойствами известных токосъёмных материалов: троллейбусная вставка ИЛГТ 741582010, имеющая фазовый состав 43% Fe + + 42% Cu + 10% Pb + 2% Zn + Гр и щётка МГ, имеющая примерный состав 70 об.% Cu + 30 об.% Гр.

Результаты и обсуждение

Увеличение электропроводности зоны контакта осуществляется за счёт уменьшения удельного электросопротивления ρ токосъёмного материала. Однако это выполняется в случае, когда материал поверхностного слоя не изменяется в процессе трения и его удельное электросопротивление ρ_1 остаётся равным удельному электросопротивлению ρ объёма материала. Если материал формирует вторичные структуры (ВС), то электропроводность контакта будет зависеть от ρ_1. На рис. 1*а*, *б* видно, что композит 1, имеющий самое высокое ρ, формирует зону контакта с относительно высокой электропроводностью. Низкая электропроводность зоны трения композитов 2 и 4 может быть обусловлена их низкой твёрдостью (таблица). Поэтому поверхностный слой подвергается сильной пластической деформации, в результате которой возникают структурные дефекты и трещины, что приводит к высокой интенсивности изнашивания (рис. 1*в*). На рис. 1*а*, *б* видно также, что при трении с плотностью тока j > 50 А/см^2 электропроводность композитов 1 и 3 увеличивается в результате того, что ток начинает течь в контактном пространстве в виде электроразрядов. Это проявляется в виде уменьшения наклона кривой вольтамперной характеристики (ВАХ). Композиты 2 и 4 не формируют зону трения с электроразрядной проводимостью, так как до её появления возникает катастрофическое изнашивание (рис. 1*в*). Соотно-

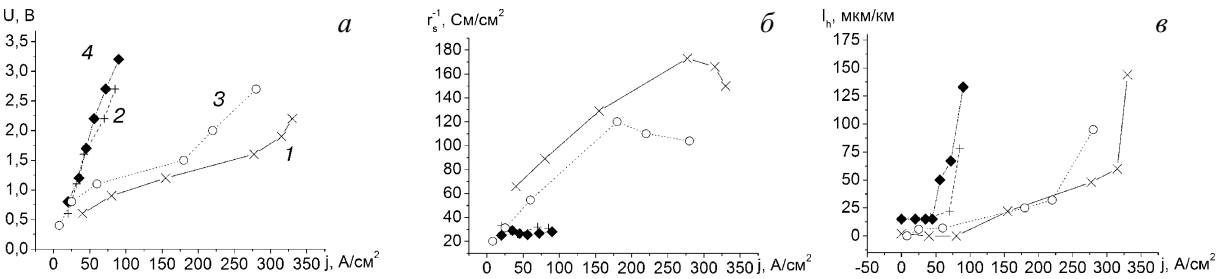
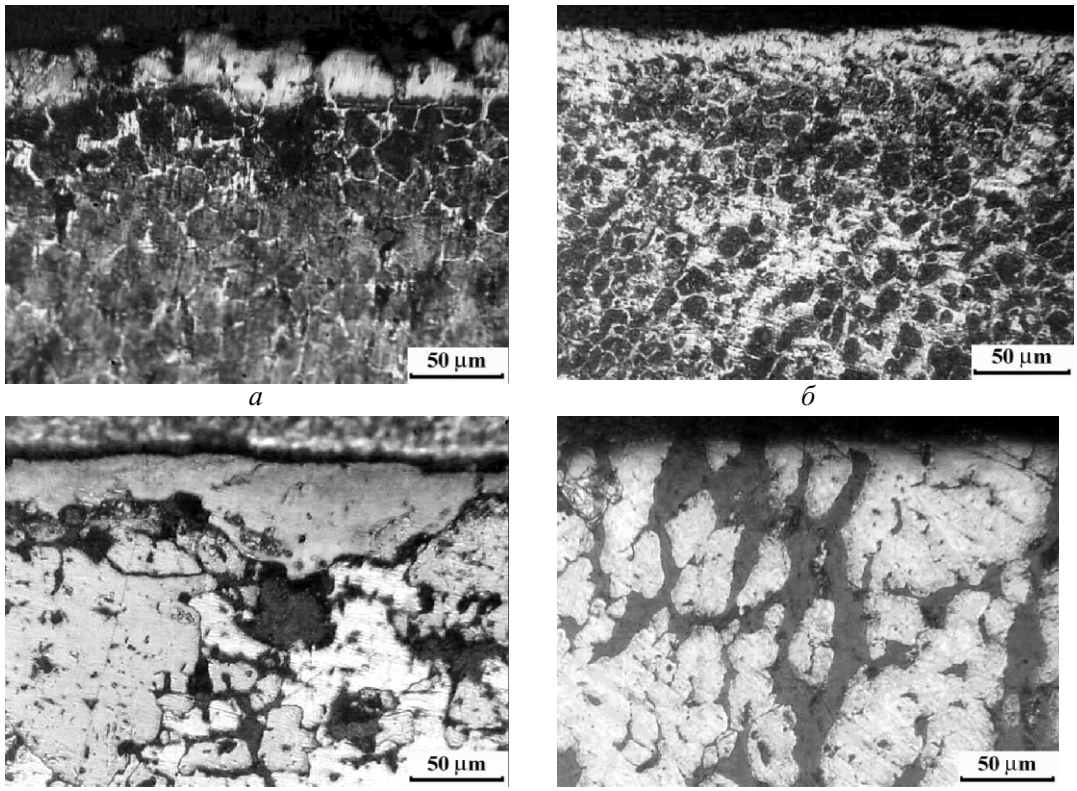


Рис. 1. Вольтамперная характеристика (*а*), электропроводность единичной площади (*б*) и интенсивность изнашивания (*в*) зоны трения композитов: *1* — Cu + 10% Гр + 70% ШХ15, *2* — Cu + 10% Гр + 40% ШХ15, *3* — ИЛГТ, *4* — МГ.



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Структура и сечение поверхности трения, параллельное направлению скольжения композита 1 (*а*), композита 2 (*б*), композита 3 (*в*) и композита 4 (*г*).

шение тока, обусловленного электроразрядами, и тока через фактические пятна контакта, а также плотность тока на фактических пятнах контакта являются электрическими параметрами трибосистемы с токосъёмом. Представляется целесообразным оценить их зависимость от контактной плотности тока.

Общая электропроводность r^{-1} обусловлена протеканием тока i_1 через пятна фактического (непосредственного) контакта и тока i_2 в виде электроразрядов через пространство вне пятен контакта. Поэтому r^{-1} можно выразить через сопротивление системы двух параллельно соединённых проводников, то есть

$$r^{-1} = r_1^{-1} + r_2^{-1}. \qquad (1)$$

где r — общее сопротивление контакта, r_1 — сопротивление на пятнах фактического контакта, r_2 — сопротивление на электроразрядах. Сопротивление r_1 необходимо определять при плотности тока менее 50 А/см^2 (в отсутствие электроразрядов) для контакта гладкого контртела и модельного композита, который имеет изменённую структуру поверхности трения, представленную на рис. 2*а – г*. Определение r_1 по закону Ома после трения при нескольких режимах показало, что можно допустить $r_1 \approx$ const. Поэтому в соответствии с (1) поведение r^{-1} определяется зависимостью $r_2^{-1}(j)$, которая должна иметь максимум при некоторой плотности тока аналогично кривой $r_s^{-1} = r^{-1} / A_a$ (рис. 1*б*). Следует отметить, что токи $i_1 = Ur_1^{-1}$ и $i_2 = Ur_2^{-1}$ увеличиваются при увеличении контактной плотности тока, поэтому представляет интерес рассмотреть, как при этом изменяется соотношение токов i_2/i_1. Считая $i_2 / i_1 = (i - i_1) / i_1$, можно записать

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{ir_1}{U} - 1. \qquad (2)$$

Подставляя в (2) ток $i = jA_a$ и напряжение U из рис. 1*а*, можно видеть (рис. 3*а*), что при скольжении с повышенной контактной плотностью тока основной ток протекает в виде электроразрядов, так как $i_2/i_1 > 1$. Не исключено, что большинство металлических материалов проявляет этот эффект при трении с токосъёмом без смазки. Видно также, что зависимость i_2/i_1 при увеличении плотности тока имеет чётко выраженный максимум (рис. 3*а*), соответствующий началу катастрофического изнашивания (рис. 1*в*). Уменьшение i_2/i_1 в режиме катастрофического изнашивания вызвано резким увеличением коли-

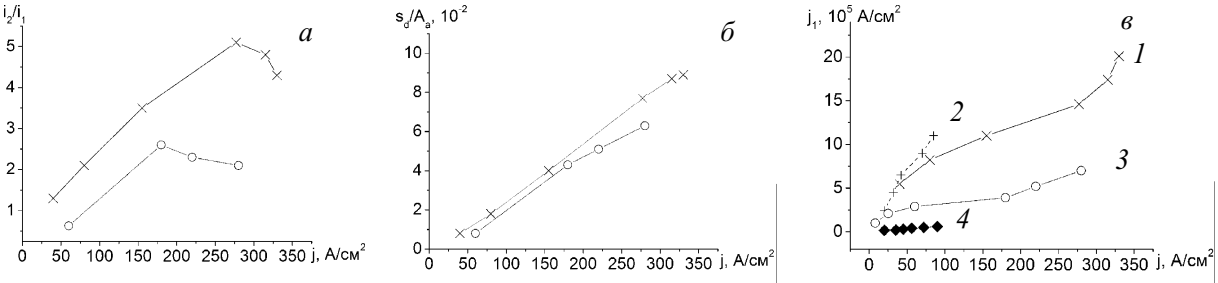


Рис. 3. Электрические параметры зоны трения композитов: *1* — Cu + 10% Гр + 70% ШХ15, *2* — Cu + 10% Гр + 40% ШХ15, *3* — ИЛГТ, *4* — МГ.

чества окислов и границ раздела оксид-ВС или несплошностей в виде трещин, пор и т.п. на поверхности трения, что уменьшает эмиссионную способность поверхности трения, то есть увеличивает в первую очередь r_2. В это же время ток i_1 может только увеличиваться, что вызывает дополнительное уменьшение i_2/i_1. Экстраполяция кривой i_2/i_1 на ось j при значениях $i_2 = 0$ показывает, что разряды ($i_2 > 0$) образуются в зоне трения композита 3 около 50 А/см^2, а композит 1 формирует зону трения, в которой i_2 всегда больше нуля.

Увеличение токопроводящей площади за счёт возникновения электроразрядов вызывает интерес оценить её относительный размер. Расчёт этой площади s_d с учётом гипотетического стягивания силовых линий электрического поля в контактном пространстве на электроразрядах приводит к значениям $s_d/A_a \sim 10^{-3}$ [3], что заметно выше площади фактического контакта A_r/A_a (таблица). Предположение о стягивании на электроразрядах было основано на том, что в зоне трения разряд является проводником с током. Пятно контакта также является проводником с током. Время жизни обоих проводников сравнимо, поэтому предполагалось, что для проявления стягивания природа проводника не имеет значения. Однако стягивание на электроразрядах не

Таблица

Свойства композитов и параметры зоны контакта при скольжении по стали 45

Свойства	Композит			
	Cu + + 10% Гр + + 70% ШХ Композит 1	Cu + + 10% Гр + 40% ШХ Композит 2	ИЛГТ Композит 3	МГ 70% Cu+ + 30% Гр Композит 4
ρ, мкОм·м	0,25	0,15	0,19	0,16
HB, ГПа	2	0,57	0,61	0,094
П, %	12	25	15	28
r_1, Ом	0,35	0,31	0,3	0,35
r_{1s}, См/см^2	28,6	32,3	33,3	33,3
HB_1, ГПа	4,16	1,65	1,015	0,089
A_r/A_a, 10^{-5}	3,1	7,9	12,8	146

отмечено в литературе по электрофизике, например, в работах [4, 5], что может указывать на отсутствие этого явления. Поэтому в настоящей работе оценка площади s_d проводится на основе других соображений. Для этого необходимо представить, что совокупность электроразрядов создаёт ток i_2 на некоторой суммарной площади s_d. Соответствующая плотность тока электроразрядов может быть выражена в виде $j_2 = i_2/s_d$. Отсюда $s_d/A_a = (i - i_1)/A_a j_2$ или в окончательном виде

$$\frac{s_d}{A_a} = \frac{j - U r_{1s}^{-1}}{j_2}. \qquad (3)$$

Величины j, U следует взять из вольтамперной характеристики контакта (рис. 1*а*). Электропроводность единичной площади контакта $r_{1s}^{-1} = r_1^{-1}/A_a$ представлена в таблице. Величина j_2 может быть выбрана из общих соображений с учётом того, что плотность тока разряда в технических устройствах может достигать значений 10^5 А/см^2 в начальной стадии его развития и около $3 \cdot 10^3$ А/см^2 в средней стадии развития [6]. Плотность тока в сварочной дуге не превышает $2 \cdot 10^3$ А/см^2 [7]. Стример молнии (начальная стадия естественного разряда) имеет диаметр 10 – 25 см и ток в пределах 10^6 А [8]. Соответствующая плотность тока не превышает $2{,}5 \cdot 10^3$ А/см^2. Поэтому представляется логичным допустить $j_2 \approx 3 \cdot 10^3$ А/см^2. Подставляя все эти величины в (3) можно получить зависимость отношения s_d/A_a от контактной плотности тока. На рис. 3*б* видно, что при принятых допущениях общая площадь, занимаемая электроразрядами, увеличивается при увеличении контактной плотности тока и ход кривой не изменяется при наступлении режима критического изнашивания. Видно также, что токопроводящая площадь, обусловленная совокупностью электроразрядов, заметно превышает площадь фактического контакта A_r (таблица). Экстраполяция кривой $s_d(j)$ на ось j при $s_d = 0$ позволяет определить приблизительную плотность тока, при которой

возникают электроразряды. На рис. 3*б* видно, что в зоне трения композита ИЛГТ разряды возникают при $j \approx 50$ А/см^2, в зоне трения композита 1 — при $j \approx 20$ А/см^2.

Увеличение токопроводящей площади за счёт образования электроразрядов приводит к снижению износостойкости и появлению шумов в токосъёмном узле, что является нежелательными явлениями. Поэтому можно предположить, что износостойкий скользящий электроконтакт для трения без смазки с повышенной плотностью тока может быть создан не за счёт поиска оптимального фазового состава токосъёмного материала. Более предпочтительным направлением создания композита, износостойкого в этих условиях, может быть обеспечение высокой токопроводящей площади за счёт введения расплава металла в контактное пространство. Но эти работы очень немногочисленны [3, 4].

Некоторый интерес может представлять плотность тока j_1 на пятнах контакта, которая может быть выражена как $j_1 = i_1/A_r$, где A_r — фактическая площадь механического контакта. В общем случае площадь фактического токопроводящего контакта на площади A_r меньше A_r, но для оценки j_1 следует принять, что площадь A_r полностью проводит ток. Следует учесть, что интенсивность изнашивания заметно больше нуля, то есть материал зоны трения пластически деформируется. При пластическом контакте $A_r \approx N/HB_1$ [4, 9], где N — нагрузка на образец, HB_1 — твёрдость по Бринеллю пятна контакта, которую можно принять равной твёрдости поверхностного слоя. В настоящей работе принято, что твёрдость HB_1 вторичных структур не зависит от плотности тока на любом участке ВАХ. Это оправдано тем, что деформация выступа шероховатости приводит к температурной вспышке и объём пятна контакта интенсивно насыщается окислителями из атмосферы, образуются неравновесные растворы окислителей в деформируемом объёме. Могут образоваться также стабильные окислы или другие фазы. Эти факторы приводят к увеличению твёрдости пятна контакта. Поэтому совместно с уменьшением твёрдости за счёт увеличения температуры происходит увеличение твёрдости за счёт насыщения пятна контакта окислами и неравновесным растворами окислов. Какой из этих двух процессов преобладает, установить невозможно. Поэтому представляется логичным сделать допущение, что $HB_1 \approx$ const. При этом учитывается, что при увеличении плотности тока увеличивается толщина слоя ВС. Определение HB_1 проведено путём измерения микротвёрдости поверхностного слоя на шлифе поперечного сечения (рис.2) при максимальной толщине слоя ВС и нахождения соответствующего ему значения HB по таблице перевода чисел твёрдости [10]. Значения HB_1 и r_1, характерные для зоны трения изучаемых композитов, представлены в таблице. Учитывая, что $i_1 = U/r_1$, можно записать

$$j_1 = \frac{U \cdot HB_1}{r_1 N}. \qquad (4)$$

На рис. 3*б* видно, что параметр j_1 имеет численные значения, характерные для контакта металл – металл [4]. Видно также, что j_1 монотонно увеличивается при увеличении контактной плотности тока j. Однако при значениях j, соответствующих началу катастрофического изнашивания, происходит увеличение наклона зависимости $j_1(j)$. Причиной этого может быть сопутствующее увеличение U (рис. 1*а*), которое должно быть связано с увеличением количества дефектов (оксиды, трещины и т.п.) в пятне контакта. В этом случае нельзя принимать допущение r_1=const и следует считать, что r_1 увеличивается и вызывает более быстрое увеличение U. Относительно невысокое значение плотности тока j_1 в зоне трения композита 3 (рис. 3*в*) обусловлено его способностью формировать большую площадь фактического контакта за счёт невысокой твёрдости его вторичных структур HB_1 (таблица) и вероятным созданием пластичной свинцовой плёнки на поверхности трения. Композит 4 (МГ) имеет низкую плотность тока j_1 вследствие большой площади A_r.

Низкая износостойкость композитов 2 и 4 обусловлена быстрым разрушением поверхности трения вследствие адгезии меди к стальному контртелу. Не исключено, что большое количество меди в композите не позволит осуществить скользящий токосъём, имеющий высокую электропроводность и износостойкость при повышенной плотности тока без смазки. Можно предположить также, что давление 0,13 МПа, применяемое в настоящей работе, является недопустимо высоким для композитов с большим содержанием меди. Поэтому содержание меди должно быть меньше 50% в композитах, предназначенных к трению при повышенной плотности тока.

Заключение

Высокие износостойкость и электропроводность зоны трения при повышенной плотности тока без смазки не могут быть достигнуты композитами, содержащими более 50%Cu. Повышенная плотность тока в зоне трения металлических композитов приводит к тому, что основной ток течёт через контакт в виде электроразрядов. Начало катастрофического изнашивания композитов, формирующих зону

трения с электроразрядами, сопровождается изменением наклона зависимости электрических параметров от контактной плотности тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта III.20.2.4 программы III.20.2 фундаментальных исследований СО РАН.

Литература

1. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спечённые антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980, 404 с.
2. Костецкий, Н.Г. Носовский, А.К. Караулов. Поверхностная прочность металлов при трении. Киев: Техника, 1976, 292 с.
3. Фадин В.В., Алеутдинова М.И. Изменение электросопротивления контакта металлический композит – сталь под действием трения и электрического тока. ЖТФ, 2010, т. 80, № 12, с. 95 – 100.
4. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты: Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2008, 560 с.
5. Хольм Р. Электрические контакты. Пер. с англ. М.: Иностр. Лит., 1961, 464 с.
6. Самервил Дж.М. Электрическая дуга (перевод с англ.). М-Л.: Госэнергоиздат, 1962, 120 с.
7. Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие. Под ред. В.В.Смирнова. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986, 656 с .
8. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов (4-е изд.). М.: Наука, 1968, 940 с.
9. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970, 227 с.
10. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия,1986, 541 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.tsc.ru.*

Алеутдинова Марина Ивановна *— Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), Северский технологический институт НИЯУ МИФИ (г. Северск), кандидат технических наук, научный сотрудник. Специалист в области порошкового материаловедения. E-mail. aleut@ispms.tsc.ru.*