

УДК 620.891

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВ НИКЕЛЕВОГО САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ СПЛАВА И БРОНЗЫ

Е. Э. ФЕЛЬДШТЕЙН^а, О. Г. ДЕВОЙНО^б, М. А. КАРДАПОЛОВА^б, Н. И. ЛУЦКО^б, Д. ЖУРЕК^а,
М. МИХАЛЬСКИ^а

Рассмотрены микроструктуры, коэффициенты трения и относительный износ композиционных покрытий на базе никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Установлено, что композиционные покрытия имеют сложную структуру. Покрытие из бронзы, нанесённое на валики никелевого сплава, кристаллизуется в виде дендритов с осями, расположенными под углом 45°. Никелевый сплав имеет глобулярно-дендритную структуру, между ветвями которой кристаллизуется эвтектическая составляющая. В условиях концентрированной нагрузки мгновенные коэффициенты трения не зависят от скорости наплавки, их значения составляют 0,08—0,12 в зависимости от нагрузки. Интенсивность изнашивания покрытий в этом случае существенно зависит от условий лазерной наплавки. В условиях распределённой нагрузки интенсивность изнашивания покрытий зависит от условий лазерной наплавки. В таких условиях двухслойные покрытия имеют значительное преимущество, относительный износ снижается в десятки раз по сравнению с однослойными.

Ключевые слова: лазерная наплавка, композиционное покрытие, никелевый сплав, бронза, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

Введение. Лазерная наплавка в настоящее время находит широкое применение при нанесении покрытий как на новые, так и изношенные (при ремонтных работах) детали машин. Она обычно используется для формирования на поверхности детали слоёв относительно небольшой ширины и толщины. Разработанные коаксиальные системы транспортирования наплавляемых сплавов дают возможность нанесения слоя на сложные трёхмерные поверхности при их различной ориентации. Потребляемая энергия в процессе лазерной наплавки ниже по сравнению с другими способами наплавки, что обеспечивает образование мелкозернистых микроструктур с высокими механическими и эксплуатационными свойствами, а также минимальные деформации детали. Поверхность покрытия обычно гладкая, без внутренних дефектов и имеет хорошую металлургическую связь с основным материалом детали (подложкой) [1]. Известны исследования, посвящённые оптимизации технологических параметров лазерной наплавки [2], формированию покрытий с различными структурами [3], изучению их физико-механических характеристик [4].

В настоящее время наиболее широко для нанесения слоёв с улучшенными рабочими характеристиками на поверхности детали машин используются самофлюсующиеся сплавы на железной, никелевой и кобальтовой основе. Согласно многим исследованиям, сплавы на никелевой и кобальтовой основе характеризуются хорошей смачиваемостью, раскисляющей и флюсообразующей способностью [5], высокими физическими и механическими характеристиками [6], высоким сопротивлением изнашиванию [7], окислению и высокотемпературной коррозии [7, 8].

а Зеленогурский университет. Польша, 65-516, г. Зелена Гура, ул. проф. З. Шафрана, 4.

б Белорусский Национальный Технический Университет. Беларусь, 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: E.Feldsztein@ibem.uz.zgora.pl

Лазерная наплавка используется также для нанесения на поверхность детали слоя бронзы, но исследования этого процесса представлены в литературе весьма ограниченно как по сравнению с другими технологиями наплавки (плазменной, электродуговой и др.), так и по маркам бронзы (рассматриваются преимущественно никель-алюминиевые бронзы [9]).

Ограничены также данные по использованию композиционных покрытий — преобладают покрытия, упрочнённые твёрдыми включениями различных типов, в первую очередь карбидами или частицами твёрдых сплавов [6, 7]. Все это позволило сформулировать цель настоящего исследования.

Цель исследования. Сравнительная оценка особенностей трения и изнашивания композиционных покрытий, сформированных на поверхности детали лазерной наплавкой никелевого самофлюсующегося сплава и бронзы, в зависимости от условий наплавки.

Материалы и методы исследований. Для формирования композиционных покрытий использовались порошки никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 (табл. 1).

Таблица 1. Состав и свойства компонентов композиционных покрытий

Марка сплава	C, %	B, %	Si, %	Cr, %	Fe, %	Al, %	Твёрдость
ПГ-12Н-01*	0,3—0,6	1,7—2,5	1,2—3,2	8—14	1,2—1,3	—	HRC 35—40
ПГ-19М-01**	—	—	—	—	4	8,5—10,5	HRB 65—70

* — остальное Ni; ** — остальное Cu

Покрытие наносилось на подложку из стали 45 методом лазерной наплавки. Исходные порошки просеивались до грануляции 20—80 мкм при помощи набора сит, а затем просушивались в электропечи при температуре 200 °С в течение двух часов. Наплавка выполнялась технологическим газовым (CO₂) лазером непрерывного действия “Комета 2” мощностью 1 кВт. Подача порошка в рабочую зону осуществлялась с расходом 8—20 г/мин коаксиально лазерному лучу через специально разработанное сопло. Рассматривались два композиционных покрытия: однослойное и двухслойное. Схемы формирования покрытий представлены на рис. 1.

Наплавка никелевого сплава осуществлялась в диапазоне скоростей 80—110 мм/мин, наплавка бронзы в диапазоне 120—150 м/мин при дистанциях наплавки 10 мм. Шаги наплавки одноименных валков принимались равными $K_1 = 2,2$ мм, разноимённых валков $K_2 = 1,1$ мм. Диаметр луча принимался равным 1 мм, соответственно плотность мощности лазерного излучения составляла $1,27 \cdot 10^5$ Вт/см². Коэффициент перекрытия одиночных дорожек после наплавки составлял 0,25. Условия формирования композиционных покрытий представлены в табл. 2. Различия в скоростях наплавки приняты с целью обеспечения равных условий теплообмена и геометрических параметров наплавляемых единичных валков из различных материалов.

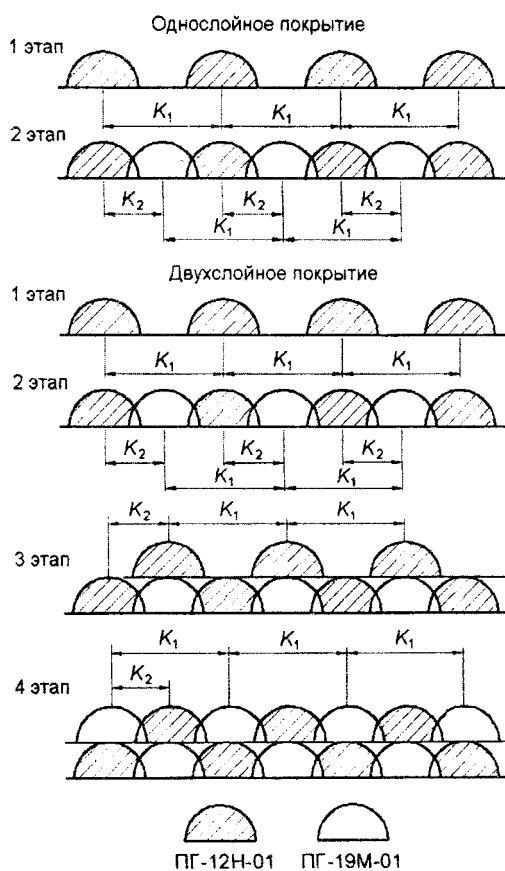


Рис. 1. Схемы нанесения покрытий

Таблица 2. Условия формирования композиционных покрытий

Тип покрытия	Скорость наплавки сплава/бронзы, мм/мин	Условное обозначение образцов
Однослойное	80/120	I-80/120
	90/130	I-90/130
	100/140	I-100/140
	110/150	I-110/150
Двухслойное	80/120	II-80/120
	90/130	II-90/130
	100/140	II-100/140
	110/150	II-110/150

С целью ускорения процесса изнашивания в качестве материала контртела использовалась инструментальная сталь NC10 (аналог стали X12МФ ГОСТ 5950–2000) для штамповки в холодном состоянии твёрдостью 60 HRC.

Трибологические испытания выполнялись как в условиях концентрированного, так и в условиях распределённого контакта. В первом случае использовалась машина трения А-135, работающая по схеме “ролик — колодка”. На поверхность колодки наносились исследуемые покрытия, ролики выполнялись из стали NC10. Испытания проводились при скорости скольжения 0,45 м/с при постоянной силе нагружения 500 Н в течение 30 мин и постоянной силе нагружения 1000 Н в течение 1 ч. В качестве смазочного материала использовалось машинное масло L-AN 68 с расходом 30 капель/мин.

Объёмный износ колодки определялся по формуле

$$I_v = \frac{D_0^2 l}{8} \left\{ 2 \arcsin \left(\frac{b}{D_0} \right) - \sin \left[2 \arcsin \left(\frac{b}{D_0} \right) \right] \right\},$$

где D_0 — диаметр ролика, l — ширина колодки, b — ширина канавки износа.

Относительный объёмный износ рассчитывался как

$$I_{v_0} = \frac{I_v}{\tau} \text{ или } I_{v_0} = \frac{I_v}{L},$$

где τ — время трения, L — путь трения.

Трибологические испытания при распределённом контакте проводились на специальной установке, выполненной на базе вертикально-сверлильного станка (рис. 2). В патроне станка закреплялось контртело 6, рабочая часть которого выполнена в виде трубки из твёрдого сплава ВК6 с толщиной стенки 1,5 мм и средним диаметром 16 мм. Вращение патрона с частотой 2300 об/мин обеспечивало линейную скорость трения 115 м/мин. Образец 7 представлял собой диск с центральным отверстием. Крепление образца в ванне 1 для сбора смазки осуществлялось при помощи шпильки 3 и гайки 2. Смазка — масло промышленное марки И-20А подавалась в зону трения капельным способом через трубку 5. Нагрузка на контртело при испытаниях обеспечивалась при помощи комплекта грузов. Относительный линейный износ определяли по глубине канавки износа, измеренной при помощи профилографа-профилометра мод. 130 (АО завод “Протон”, Россия):

$$V_{L_0} = 1000 \cdot \frac{h}{\pi n d \tau},$$

где h — средняя глубина канавки износа; n — частота вращения шпинделя; d — средний диаметр твёрдосплавного контртела; τ — время трения.

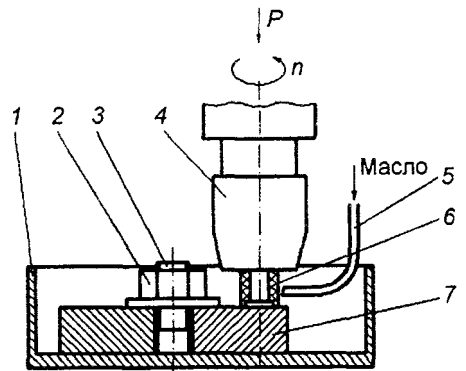


Рис. 2. Схема установки для трибологических испытаний в условиях распределённого контакта

Микроструктура покрытий, морфология и химический состав поверхностей колодок в исходном состоянии и после цикла трения анализировались с помощью оптического микроскопа “Микро Р200” (БелОМО, Беларусь) и сканирующих электронных микроскопов “Mira” (Tescan, Чехия) и “JEOL JSM-5600LV” (JEOL USA Headquarters). Ширина площадки износа измерялась с помощью большого инструментального микроскопа БМИ-1 (Новосибирский приборостроительный завод). Эксперименты реализовались трёхкратно.

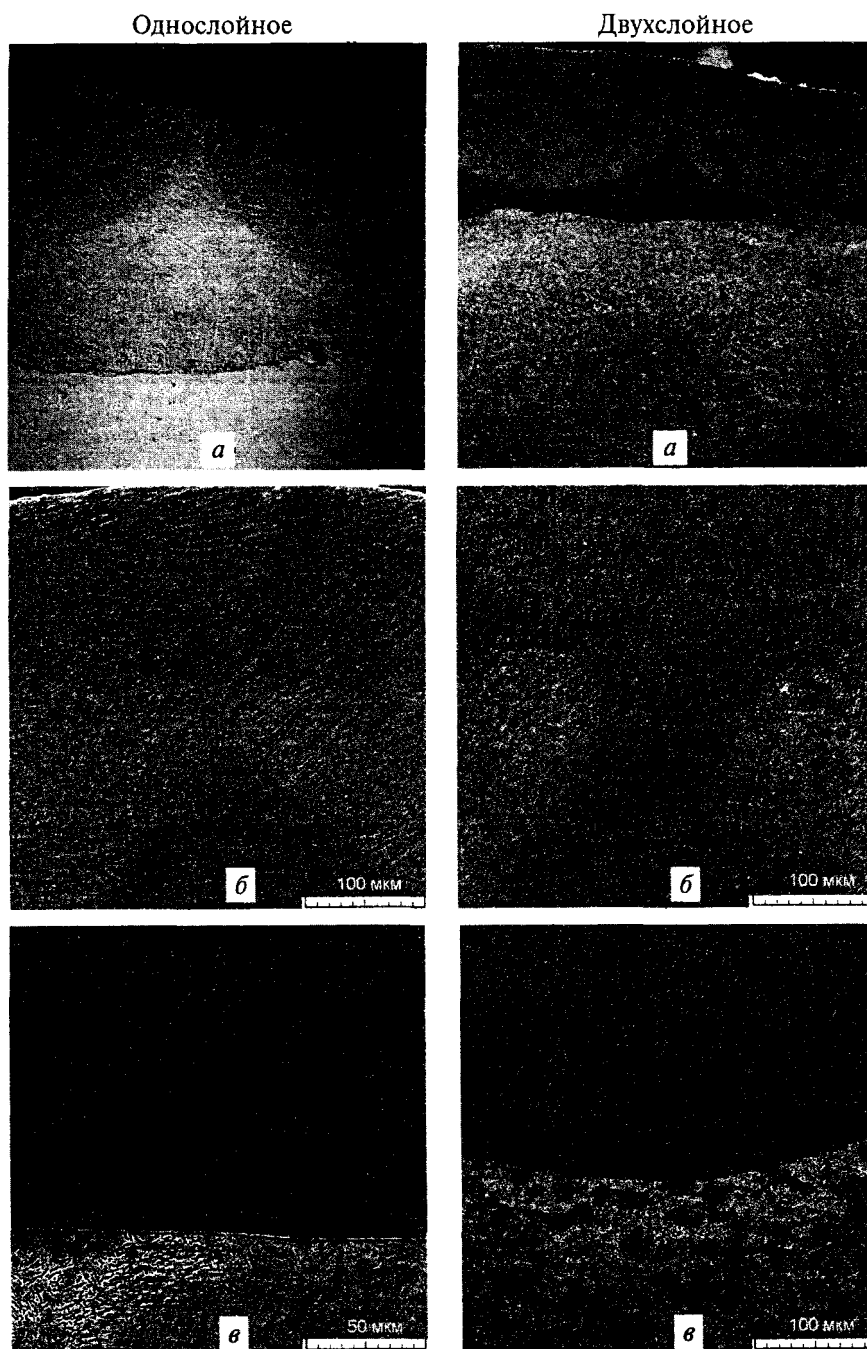


Рис. 3. Структуры покрытий: *a* — общий вид ($\times 50$); *б* — валик самофлюсующегося сплава в переходной зоне между валиками бронзы ($\times 500$); *в* — переходная зона между валиком самофлюсующегося сплава и основой ($\times 1000$)

Результаты исследований и их обсуждение. Металлографические исследования выявили сложную структуру композиционных покрытий. На границе раздела “покрытие — стальная основа” наблюдается чёткая граница раздела, что свидетельствует об отсутствии взаимной диффузии, су-

щественного разогрева образцов и сквозного проплавления покрытий (рис. 3, а, в). Покрытие из ПГ-19М-01, нанесённое на валики никелевого сплава, кристаллизуется в виде дендритов с осями, расположенными под углом 45° к поверхности, что говорит о высокой скорости кристаллизации (рис. 3, б). Сплав ПГ-12Н-01 имеет глобулярно-дендритную структуру, между ветвями которой кристаллизуется эвтектическая составляющая сплава. При увеличении скорости наплавки самофлюсующегося сплава на поверхность стали уменьшается размер переходной зоны, непрерывные твердые растворы железа и никеля не успевают образоваться, но раскисление поверхности происходит и образующаяся химическая связь достаточно высокая. Интенсивность диффузионных процессов при увеличении скорости наплавки снижается, формируется квазиэвтектическая структура, размеры частиц структурных составляющих уменьшаются, дендриты имеют только оси первого порядка (рис. 3, в). Строение дендритов зависит от скорости наплавки: при низких скоростях оно однородное, при высоких — имеет более сложный характер (рис. 4).



Рис. 4. Микроструктура переходных зон в зависимости от скорости наплавки (×2000)

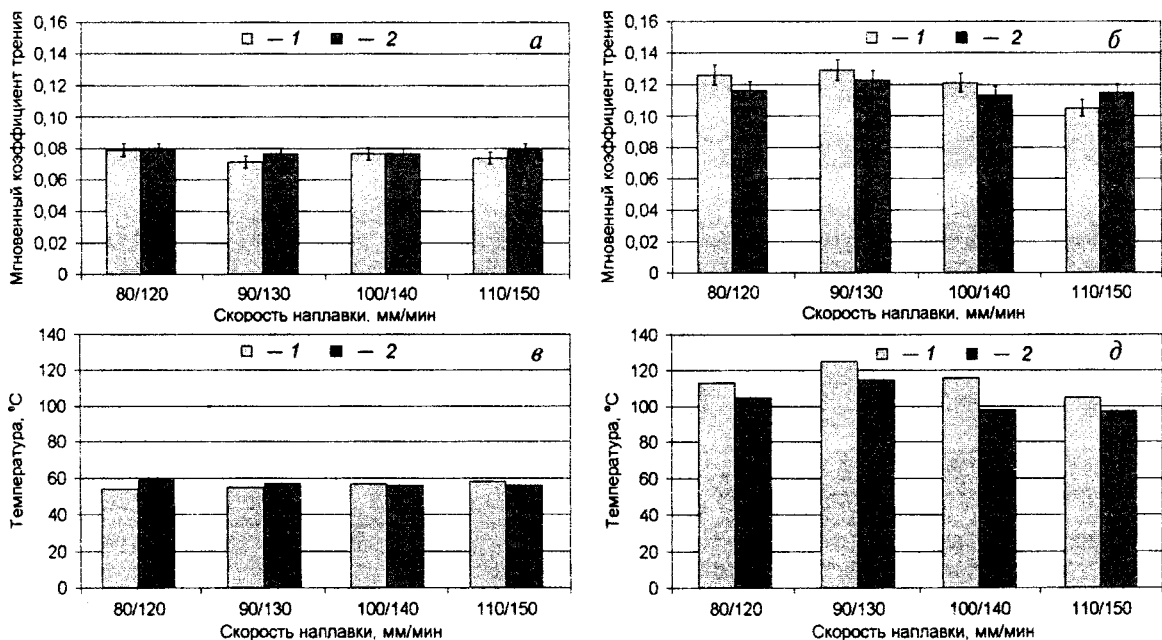


Рис. 5. Значения мгновенных коэффициентов трения и температур для однослойных (1) и двухслойных (2) покрытий: а, в — нагрузка 500 Н; б, д — нагрузка 1000 Н

Мгновенные коэффициенты трения только в незначительной степени зависят от скорости наплавки (рис. 5). При этом их значения достаточно стабильны и невелики: менее 0,08 при нагрузке 500 Н и около 0,12 при нагрузке 1000 Н. В первом случае количество слоёв в покрытии практиче-

ски не влияет, во втором — несколько снижает коэффициенты трения. Подобный характер изменения наблюдается также для температур в зоне трения. При этом их значения достаточно высоки, что связано с низкой теплопроводностью никелевого сплава.

Как коэффициент трения, так и температура стабилизируются в течение короткого отрезка времени (рис. 6). Некоторое снижение коэффициента трения во времени можно объяснить снижением фактического давления на площадке контакта по мере роста износа образцов.

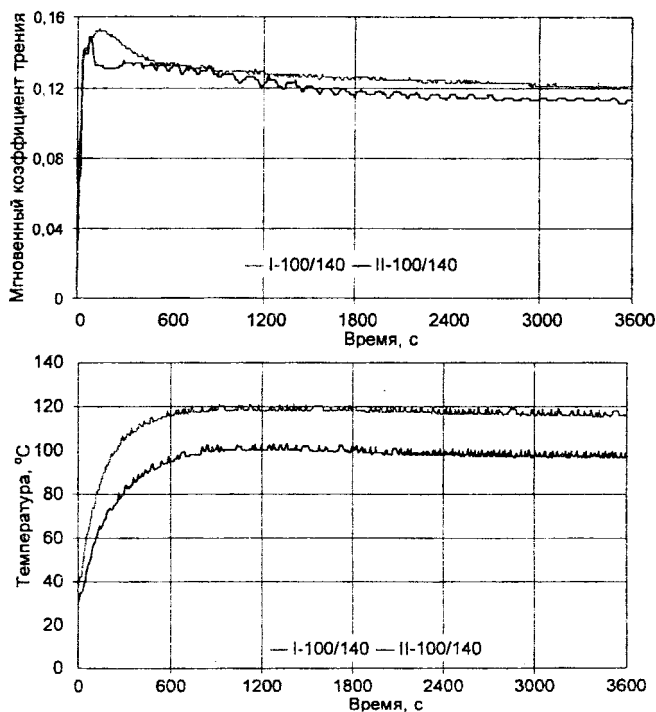


Рис. 6. Типовые изменения во времени мгновенного коэффициента трения и температуры трения

В условиях концентрированного контакта интенсивность изнашивания покрытий существенно зависит от условий лазерной наплавки — скорости и количества слоёв (рис. 7). При менее значительных нагрузках преимущества имеют двухслойные покрытия, при более высоких — однослойные.

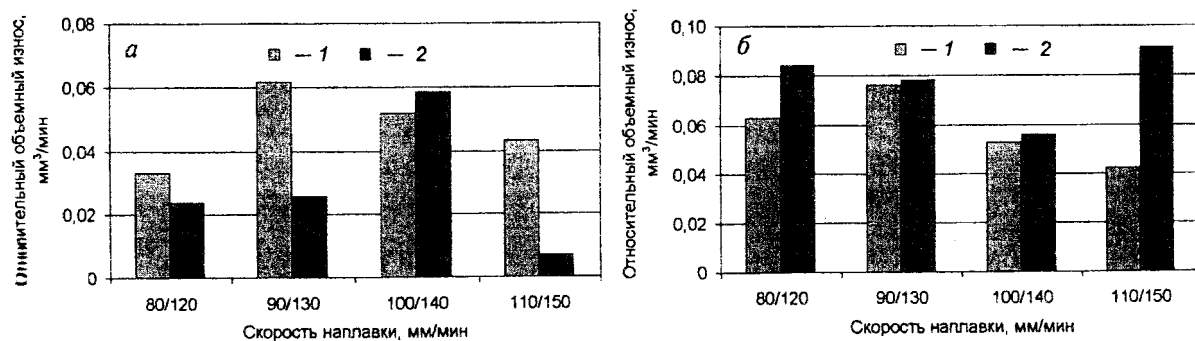
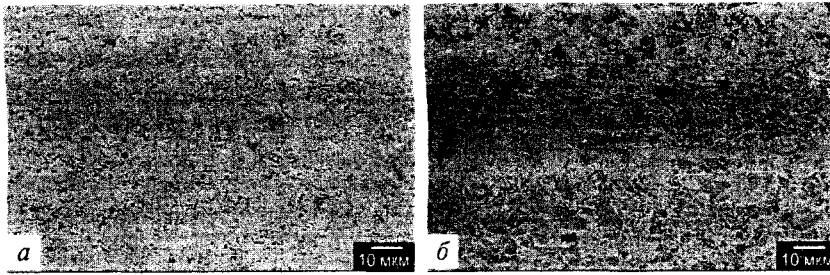


Рис. 7. Интенсивность изнашивания однослойных (1) и двухслойных (2) покрытий в условиях концентрированного контакта: а — нагрузка 500 Н; б — нагрузка 1000 Н

Значительные давления на площадках контакта вызывают изменения в интенсивности изнашивания областей никелевого сплава и бронзы. Как следствие, на поверхностях трения формируются области микрометрических размеров, в которых в процессе трения находится масло (рис. 8). Увеличение скорости наплавки интенсифицирует этот процесс, поскольку увеличивает разнородность исходной структуры покрытий.

Однослойные покрытия



Двухслойные покрытия

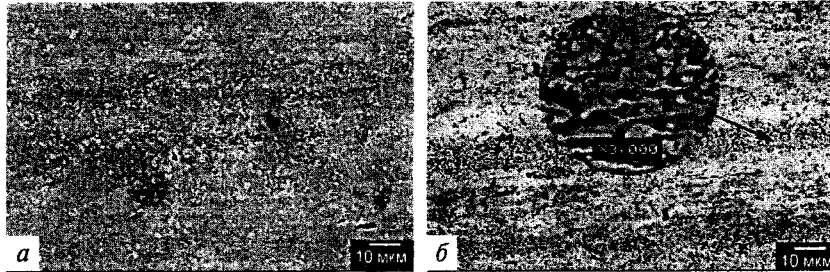


Рис. 8. Площадки износа покрытий: *a* — скорость наплавки 80/120 мм/мин; *б* — скорость наплавки 100/140 мм/мин

В условиях распределённого контакта интенсивность изнашивания покрытий также зависит от условий лазерной наплавки. При увеличении нагрузки на контртело со 120 до 240 Н величина относительного линейного износа однослойного композиционного покрытия возрастает в 1,7–2,2 раза (рис. 9, *a*). При этом износ покрытия при скорости наплавки 100/140 мм/мин выше, чем при скорости наплавки 110/150 мм/мин. Величина нагрузки влияет на износ в небольшой степени и схватывание не наблюдается. При увеличении нагрузки до 360 Н для покрытия, наплавленного при скорости 110/150 мм/мин, имеет место схватывание, и величина износа возрастает почти в 4 раза. Подобные изменения процесса изнашивания описаны в [10]. Для покрытия, наплавленного при скорости 100/140 мм/мин, при увеличении нагрузки на контртело до 360 Н величина износа возрастает всего на 15% при отсутствии схватывания. При анализе структур было установлено, что покрытие, наплавленное при скорости наплавки 110/150 мм/мин, имеет более мелкозернистую структуру, что увеличивает износостойкость покрытия. Однако это наблюдается только при низких и средних нагрузках. При значительных нагрузках большее значение имеет сила сцепления материала валиков по границам зёрен, которая выше при скорости наплавки 100/140 мм/мин. Поэтому в покрытии, наплавленном при скорости наплавки 110/150 мм/мин, при большой нагрузке начинается разрушение материала валиков, приводящее к износу схватыванием.

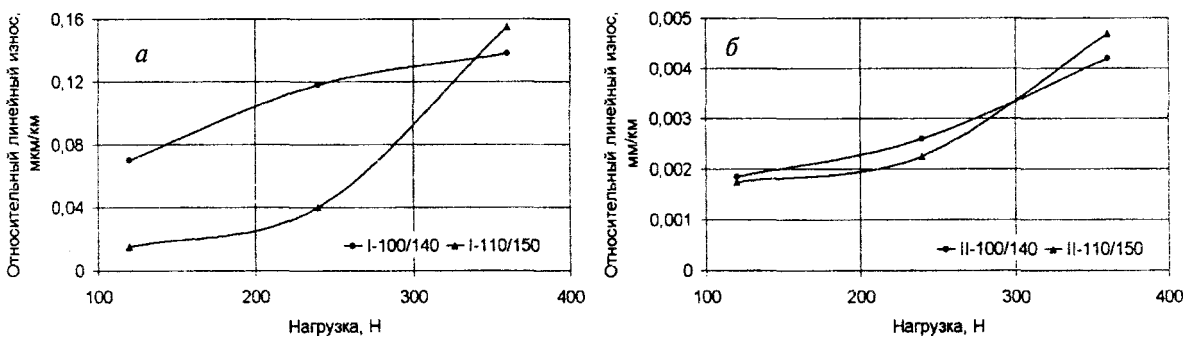


Рис. 9. Интенсивность изнашивания однослойных (*a*) и двухслойных (*б*) покрытий в условиях распределённого контакта

На рис. 9, *б* приведены зависимости относительного линейного износа от нагрузки для двухслойного композиционного покрытия. При увеличении нагрузки на контртело со 120 до 240 Н из-

нос для рассматриваемых скоростей наплавки возрастает на 35—40 %. При этом износ покрытия, наплавленного при скорости 100/140 мм/мин, несколько выше, чем наплавленного при скорости 110/150 мм/мин. В этом случае, как и для однослойного композиционного покрытия, наблюдается изнашивание без схватывания. При увеличении нагрузки до 360 Н относительный линейный износ для обеих скоростей наплавки возрастает в 1,6—2,0 раза, т. е. происходит переход к износу схватыванием. Причина данного явления, скорее всего такая же, как для однослойного композиционного покрытия.

В условиях распределённой нагрузки двухслойные покрытия имеют значительное преимущество, относительный износ снижается в десятки раз по сравнению с однослойными.

Выводы. Мгновенные коэффициенты трения композиционных покрытий только в незначительной степени зависят от скорости наплавки, их значения составляют менее 0,08 при концентрированной нагрузке 500 Н и около 0,12 при нагрузке 1000 Н. Интенсивность изнашивания покрытий в условиях концентрированного контакта существенно зависит от условий лазерной наплавки. При менее значительных нагрузках преимущество имеют двухслойные покрытия, при более высоких — однослойные. На поверхностях трения композиционных покрытий формируются области микрометрических размеров, в которых в процессе трения находится масло. В условиях распределённой нагрузки интенсивность изнашивания покрытий также зависит от условий лазерной наплавки. В таких условиях двухслойные покрытия имеют значительное преимущество, относительный износ снижается в десятки раз по сравнению с однослойными.

Обозначения

I_V — объёмный износ; D_0 — диаметр ролика; l — ширина колодки, b — ширина канавки износа; I_{V_0} — относительный объёмный износ; τ — время трения, L — путь трения; I_{L_0} — относительный линейный износ; h — средняя глубина канавки износа; n — частота вращения шпинделя; d — средний диаметр твёрдосплавного контртела.

Литература

1. Ion J. C. Laser Processing of Engineering Materials. Principles, Procedure and Industrial Application. Chapter 12 — Cladding. — Cambridge: Elsevier Ltd. — 2005, 296—326
2. Boussaha E., Aouici S., Bahloul A., and Cherif Sahour M. Optimization of Geometrical Features of Laser Cladding Obtained by Powder Injection // Physics Procedia. — 2009 (2), № 3, 1147—1152
3. Hemmati I., Ocelík V., and De Hosson J. Th. M. 6-Compositional Modification of Ni-Base Alloys for Laser-Deposition Technologies // In: Laser Surface Engineering. Processes and Applications / Ed. by J. R. Lawrence, C. Dowding, D. Waugh, and J. B. Griffiths. — Cambridge: Elsevier Ltd. — 2015, 137—162
4. Архипов В. Е., Аблаев А. А., Краснов Л. Т. Физико-механические характеристики покрытий, наплавленных лазерным излучением // Сварочное производство. — 1992, № 1, 18—20
5. Ju Y., Guo S. Y., and Li Z. Q. Status and Development of Laser Surface Alloying and Laser Cladding in China // Materials Science and Engineering. — 2002 (20), nos. 1—2, 143—145
6. Tobar M. J., Álvarez C., Amado J. M., Rodríguez G., and Yáñez A. Morphology and Characterization of Laser Clad Composite NiCrBSi—WC Coatings on Stainless Steel // Surface & Coatings Technology. — 2006 (200), no. 22, 6313—6317
7. Chen H., Xu C., Qu J., Hutchings I. M., Shipway P. H., and Liud J. Sliding Wear behaviour of Laser Clad Coatings Based upon a Nickel-Based Self-Fluxing Alloy Co-Deposited with Conventional and Nanostructured Tungsten Carbide—Cobalt Hardmetals // Wear. — 2005 (259), nos. 7—12, 801—806
8. Fernández E., Cadenas M., González R., Navas C., Fernández R., and De Damborenea J. Wear Behaviour of Laser Clad NiCrBSi Coating // Wear. — 2005 (259), nos. 7—12, 870—875

9. Cottam R., Luzin V., Moody H., Edwards D., Majumdar A., Wong Y. C., Wang J., and Brandt M. The Role of Microstructural Characteristics in the Cavitation Erosion Behaviour of Laser Melted and Laser Processed Nickel—Aluminium Bronze // *Wear*. — 2014 (317), nos. 1—2, 56—63
10. Аксенов А. Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. — М.: Машиностроение. — 1977

Поступила в редакцию 28.12.15.

Feldshtein E., Devojno O., Kardapolava M., Lutsko N., Zurek D., and Michalski M. Tribological Characteristics of Composite Coatings Formed by Laser Cladding of Powders of Nickel Self-Fluxing Alloy and Bronze.

The microstructures, friction coefficients and relative wear rates of composite coatings on the basis of self-fluxing nickel alloy and bronze are investigated. It is found that the composite coatings have a complex structure. A coating of bronze deposited on rolls of the nickel alloy crystallizes in the form of dendrites with axes placed at an angle 45° to the surface. The nickel alloy has a globular-dendritic structure and between its branches eutectic component is crystallized. In conditions of concentrated loads the instantaneous coefficients of friction do not depend on cladding rate and their values are 0.08—0.12 depending on the load. In this case the coating wear rate depends essentially on the conditions of laser cladding. Dual layer coatings have the advantage for minor loads and single layer coatings for significant loads. In conditions of distributed load, the coating wear rate also depends on the conditions of laser cladding. Under such conditions dual layer coatings have a significant advantage; their relative wear is reduced dozens of times compared with single layer coatings.

Keywords: laser cladding, composite coating, nickel alloy, bronze, coefficient of friction, wear rate.