

Параметры лазерной обработки и их влияние на трибологические характеристики покрытий на основе железа

Кандидаты техн. наук О. В. Дьяченко¹⁾, М. А. Кардаполова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Рассмотрены вопросы повышения физико-механических и эксплуатационных свойств клеевых покрытий после лазерного оплавления с дополнительным легированием В₄С, ТаВ и МоВ. Изучено влияние лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость и износостойкость клеевых покрытий системы Fe–Cr–B–Si. С увеличением скорости лазерного луча микроструктура изменяется от равновесной до квазиэвтектической. Присутствие боридов молибдена и тантала повысило чувствительность покрытия к особенностям лазерного переплава. В обоих случаях изменились условия теплообмена, увеличилось количество боридов железа и хрома, в результате чего молибден и тантал частично перешли в свободное состояние, способствуя измельчению структурных составляющих. При введении твердых частиц В₄С в покрытие происходит их растворение в матрице железа при нагреве лазерным лучом, при охлаждении они выделяются в виде отделенных включений боридов Fe и Cr. Лазерное оплавление и легирование повышают износостойкость покрытий. Увеличение нагрузки с 30 до 70 Н повышает износ покрытий в среднем на 15–26 %, а нелегированных покрытий – на 26–43 %. Повышение скорости оплавления и диаметра лазерного пятна не оказывает значительного влияния на износ, увеличение же коэффициента перекрытия приводит к снижению износа покрытия. Наличие твердых частиц ТаВ в покрытии и повышение скорости оплавления лучом лазера снижают износостойкость покрытия. Такая довольно сложная зависимость скорости износа покрытий от условий лазерного оплавления и износа обусловлена комплексом структурных и фазовых превращений, которые способствовали формированию вторичных твердых включений и повысили микротвердость.

Ключевые слова: лазерная обработка, скорость луча лазера, микротвердость, микроструктура, покрытие, фазовый состав, интенсивность изнашивания

Для цитирования: Дьяченко, О. В. Параметры лазерной обработки и их влияние на трибологические характеристики покрытий на основе железа / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 56–63. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-56-63

Parameters of Laser Processing and Their Influence on Tribological Characteristics of Iron-Based Coatings

O. V. Diachenko¹⁾, M. A. Kardapolova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers improvement of physic-mechanical and operational properties of adhesive coatings after laser infusion with additional alloying В₄С, ТаВ and МоВ. Influence of the laser infusion with additional alloying on structure, microhardness and wear-resistance of adhesive coatings of the Fe–Cr–B–Si system has been studied in the paper. While increasing a laser beam velocity microstructure is changed from equilibrium to quasi-eutectic. Presence of molybdenum boride and tantalum increases sensitivity of the coating to specific features of laser remelting. In both cases heat exchange conditions have been changed, a number of iron and chromium borides has been increased and due to this molybdenum

Адрес для переписки

Дьяченко Ольга Владимировна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

Address for correspondence

Diachenko Olga V.
Belarusian National Technical University
67 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

and tantalum have been partially passing to free state that contributes to a disintegration of structural components. While introducing solid particles B_4C into a coating they are dissolved in an iron matrix while being heated by a laser beam and under cooling they are isolated in the form of separated Fe and Cr boride inclusions. Laser infusion and alloying increase coating wear-resistance. Load increase from 30 to 70 N improves coating wear resistance averagely by 15–26 % and wear resistance of non-alloyed coatings is improved by 26–43 %. An increase of melting rate and laser spot diameter does not exert significant influence on wear but an increase in overlapping coefficient leads to reduction of coating wear. Presence of solid particles in a coating and an increase in rate of melting by laser beam reduce coating wear resistance. Such rather complicated dependence of coating wear rate on conditions of laser melting and wearing process is due to a complex of structural and phase transformations which have contributed to formation of secondary solid inclusions and increased microhardness.

Keywords: laser processing, laser beam velocity, microhardness, microstructure, coating, phase composition, wear intensity

For citation: Diachenko O. V., Kardapolova M. A. (2018) Parameters of Laser Processing and Their Influence on Tribological Characteristics of Iron-Based Coatings. *Science and Technique*. 17 (1), 56–63. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-56-63 (in Russian)

Методы плазменного напыления покрытий находят широкое применение при упрочнении, защите и восстановлении деталей во многих отраслях промышленности [1, 2]. Способы лазерного оплавления широко используются для формирования поверхностей с повышенными эксплуатационными характеристиками. Они позволяют упрочнять обрабатываемые поверхности путем закалки или дополнительного легирования [3, 4].

Среди материалов, применяемых для нанесения покрытий и последующей лазерной обработки, большое место занимают самофлюсующиеся порошки на основе никеля и кобальта, состав которых обеспечивает формирование износостойких покрытий с высоким комплексом физико-механических свойств [5, 6]. Самофлюсующиеся сплавы широко распространены в качестве универсальных материалов в процессе создания износ- и коррозионно-стойких покрытий. Однако существенным недостатком данных материалов является их высокая стоимость. Поэтому было предложено использовать самофлюсующиеся порошки на основе железа.

Высокая стоимость и технологическая сложность методов плазменного напыления делают проблематичным их использование для небольших по площади частей детали или единичного производства. Возможная альтернатива данному методу обработки – нанесение покрытий клеевым методом. Легирующие материалы при этом наносятся на клеевой слой покрытия [7, 8].

Железо, углерод, марганец, кремний, бор и другие легирующие элементы используются в качестве основных составляющих порош-

ковой смеси для варьирования свойствами эвтектических покрытий на основе железа. Эти элементы образуют эвтектику и иные высокопрочные компоненты (карбиды, бориды, сложнoleгированные фазы), которые взаимодействуют между собой при температуре формирования эвтектики. Данные компоненты также обеспечивают высокую твердость и износостойкость, позволяют получить покрытия с относительно высокой пластичностью. В связи с этим при кристаллизации образуется высокодисперсная квазиэвтектическая структура. Отмеченная специфика во многом предопределила преимущества использования покрытий на основе железа по сравнению с другими материалами [9].

При лазерном легировании боридами и карбидами можно добиться повышения эксплуатационных характеристик и варьирования необходимыми характеристиками получаемых покрытий [3].

Цель работы – изучение влияния параметров лазерной обработки и дополнительного легирования на формирование структуры и износостойкость порошков системы Fe–Cr–B–Si.

Методика исследования

Для исследования микроструктуры использовали образцы из стали 45 прямоугольной формы сечением 10×10 и длиной 30 мм, на поверхность которых кистью наносили пасту, приготовленную смешиванием трех компонентов: клея AGO, ацетона и порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф (табл. 1). Композицию выдерживали на воздухе при комнатной температуре один час для полного удаления рас-

творителя из клеевого слоя. Толщина слоя составляла 0,6 мм. Оплавление осуществляли непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре лазерного луча $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, со скоростями движения детали относительно луча лазера (скоростями луча лазера), м/с: $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$; $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$; $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$; $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$, с коэффициентом перекрытия 0,8 после предварительного нанесения порошковых обмазок В₄С, ТаВ, МоВ на клеевой связке (3 % клея АГО в ацетоне). Содержание легирующих элементов в обмазке выбрали исходя из матрицы планирования, соответственно в долях ед.: 0, 1/3, 2/3 и 1. Толщина слоя обмазки составила 0,09–0,11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. После нанесения клеевого покрытия и оплавления образцы разрезали поперек лазерных дорожек для исключения влияния нестабильности температурных условий нагрева и охлаждения на краях образца.

Таблица 1

Химический состав порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф
Chemical composition of ПР-Х4Г2Р4С2Ф powder

Элемент, %								
Fe	B	Cr	Si	Mn	C	V	Al	Cu
Основа	3,3– 4,3	3,5– 4,5	2,0– 2,5	2,0– 2,5	1,0– 1,2	0,5– 0,9	0,05– 0,50	0,05– 0,50

Точечный микрорентгеноспектральный анализ проводили на рентгеновском микроскопе МРЭМ-200. Микрошлифы травили в 5%-м растворе пикриновой кислоты в спирте, затем – в 5%-м растворе азотной кислоты в спирте.

Протравленные образцы изучены на световом металлографическом микроскопе Unimet (Япония) при увеличении $\times 400$.

Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3.

Для исследования влияния технологических параметров на фазовый состав и некоторые физико-механические свойства покрытий использовали методы математического планирования – метод полного факторного эксперимента и центральный ортогональный композиционный план для двух факторов [4–7].

Анализ микротвердости и скорости износа выполняли с использованием метода полного факторного эксперимента.

Поскольку число варьируемых параметров невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов $Q = 2$ в степени, соответствующей числу факторов n . Это позволяет в ходе эксперимента варьировать одновременно несколько параметров различной физической природы и получать отдельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс, изменялись на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Серия состояла из восьми основных опытов. Полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (1)$$

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) находили пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых были приняты технологические характеристики лазерной обработки. Технологические факторы x_1 (скорость луча лазера относительно детали), x_2 (диаметр лазерного пятна) и x_3 (коэффициент перекрытия) выбирали, исходя из возможности их изменения при условии точного измерения их величин, а также учитывая их взаимную независимость (ортогональность).

Покрытие с самофлюсующимся сплавом на основе железа и с легирующими добавками оплавливали лазерным лучом. Введение легирующих добавок еще более усложнило проведение структурных исследований.

Определение износа покрытий выполнено на машине трения, предназначенной для ускоренных сравнительных испытаний (рис. 1).

Абразивный диск 1, изготовленный из закаленной стали 50 мм в диаметре и толщиной 2 мм, фиксировался на вертикально расположенной оси. Исследуемый образец 2 был повернут торцом к диску 1.

Образцы клеевых покрытий, оплавленные горелкой и после легирования ТаВ, МоВ и В₄С обработанные лазером (на режиме: $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с; $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, $k = 0,8$), до и после износа взвешены при помощи аналитических весов с точностью измерения 0,1 мг.

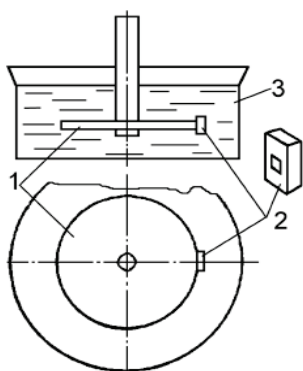


Рис. 1. Схематическая диаграмма для изучения износа
Fig. 1. Schematic diagram for studying wear

Обсуждение результатов

Как было показано в предыдущих исследованиях [7], лазерное оплавление приводит к формированию метастабильных структур, армированных дендритами первого, второго и третьего порядков, состоящих из высоколегированной тонкодисперсной эвтектики α -Fe-Cr-B, кристаллизующейся между осями дендритов. Фазовый состав покрытий для различных условий лазерного оплавления без легирования показан на рис. 2.

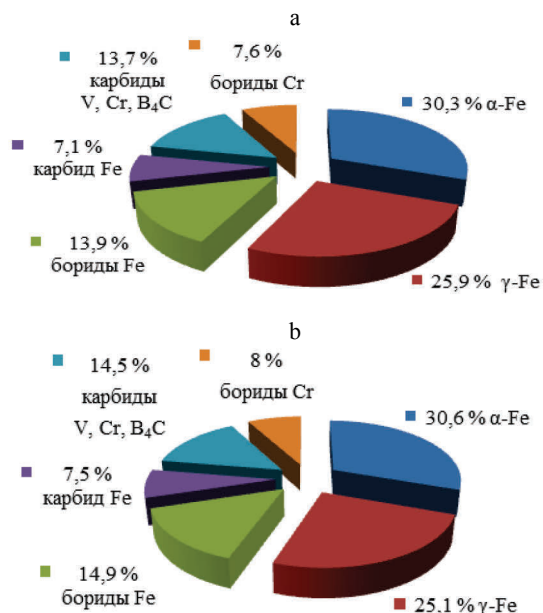


Рис. 2. Фазовый состав покрытий без армирующих добавок в зависимости от условий лазерного переплава при значении параметров:
а – минимальном; б – максимальном
Fig. 2. Phase composition of coatings without reinforcement additives according to conditions of laser remelting, at the following parameter values:
a – minimum; b – maximum

Влияние параметров лазерной обработки на структуру клевого покрытия, армированного твердыми частицами B_4C , TaB и MoB, изучено при различных условиях оплавления покрытия.

Для всех клеевых покрытий, оплавленных лазерным лучом, наблюдалась одинаковая тенденция изменения структуры, зависящая от увеличения скорости лазерного луча. Скорость лазерного луча изменила структуру от равновесной до квазиэвтектической (рис. 3). Тем не менее характеристики структуры и фазового состава зависят от состава армирующих частиц.

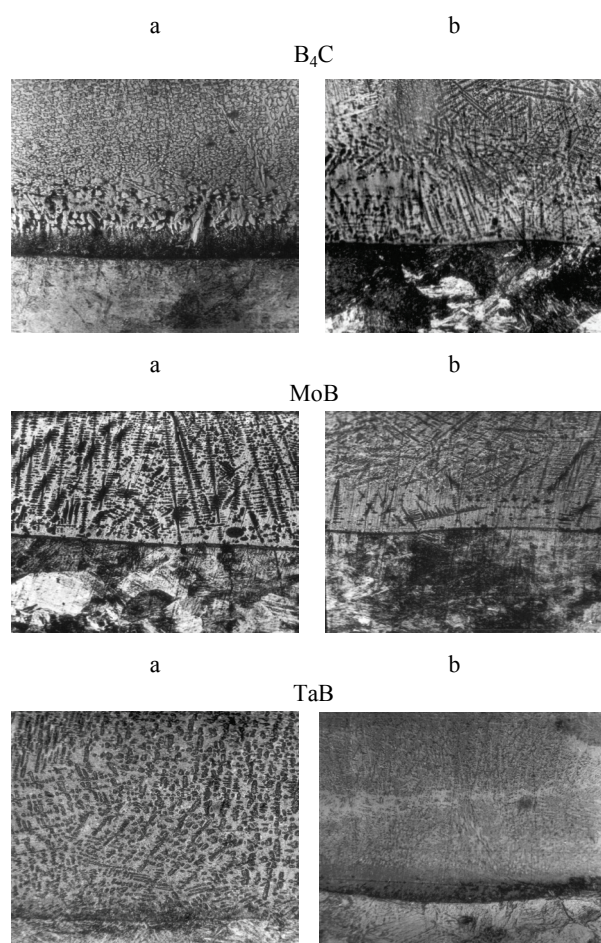


Рис. 3. Структура покрытий, армированных твердыми частицами: а – при скорости лазерного луча $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с, $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м; б – при $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с, $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м

Fig. 3. Structure of coatings reinforced by solid particles: а – at laser beam velocity $v_1 = 0.83 \cdot 10^{-3}$ m/sec, $d = 3.0 \cdot 10^{-3}$ m; б – at $v_2 = 1.67 \cdot 10^{-3}$ m/sec, $d = 3.0 \cdot 10^{-3}$ m

Когда дополнительные твердые частицы B_4C вводятся в покрытие, они успевают растворить-

ся в матрице железа при нагреве лазерным лучом, а при охлаждении выделяются в виде отдельных включений. После растворения часть частиц V_4C кристаллизуется в виде боридов Fe и Cr. Тем не менее более высокие скорости нагрева и охлаждения способствуют тому, что все структурные компоненты сплава не выпадают в осадок в чистом виде, а остаются в легированной форме. Поэтому существует высокая вероятность того, что карбиды в покрытии становятся сложнолегированными, имеют высокую твердость и образуют армированную сетчатую структуру. Изменения структуры покрытий после легирования с V_4C более детально рассмотрены в [9, 10].

С увеличением скорости нагрева (рис. 3b) размер карбидо-боридных компонентов, кристаллизующихся из сплава, существенно уменьшается. Фазовый состав покрытия показан на рис. 4. Можно сделать вывод, что условия лазерного оплавления незначительно влияют на фазовый состав.

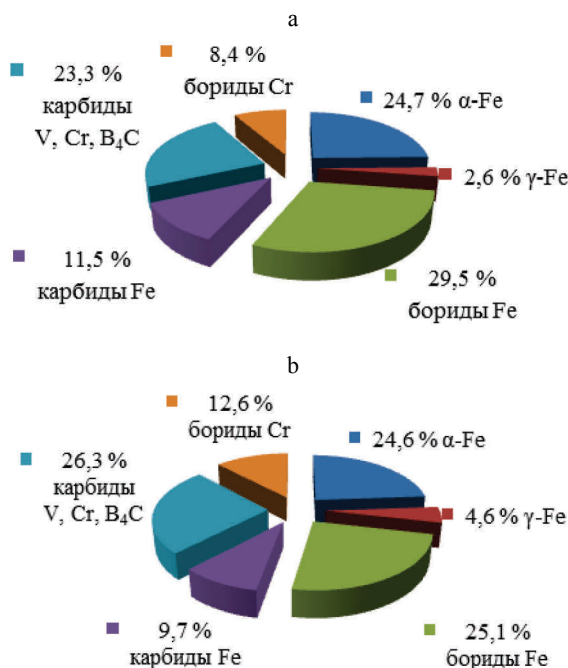


Рис. 4. Фазовый состав покрытия, армированного частицами V_4C в зависимости от условия лазерного переплава, при значении параметров: а – минимальном; б – максимальном

Fig. 4. Phase composition of coating reinforced by particles V_4C according to conditions of laser remelting, at the following parameter values: а – minimum; б – maximum

При легировании боридом молибдена часть его кристаллизуется в форме оксида молибдена, а другая переходит в железную матрицу.

Структура состоит в основном из твердых растворов и дендритов, легированных Mo, Cr и V, с осями первого и второго порядков и включениями карбидов и боридов. При увеличении скорости лазерного луча дендритные включения более выражены, степень легирования твердого раствора невелика и карбидо-боридная фаза более тонко диспергирована. Фазовый состав покрытия показан на рис. 5.

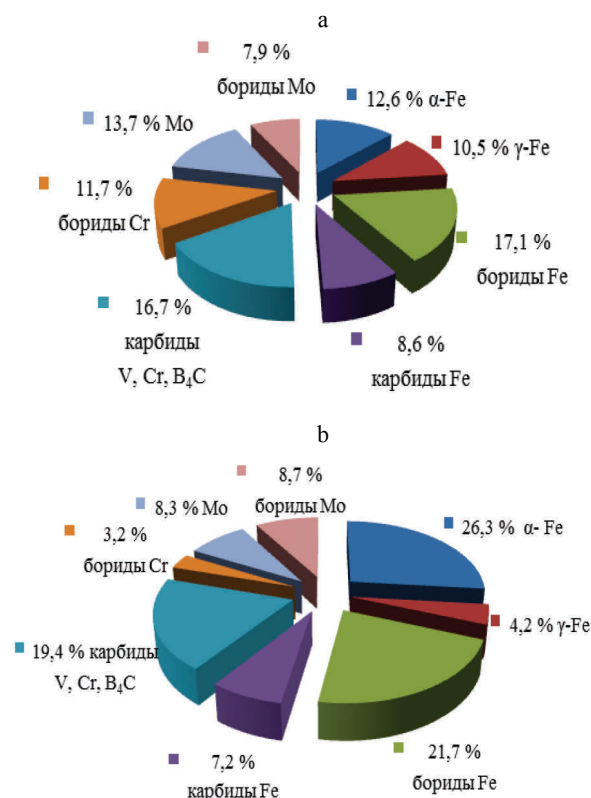


Рис. 5. Фазовый состав покрытия, армированного частицами MoB в зависимости от условия лазерного переплава, при значении параметров: а – минимальном; б – максимальном

Fig. 5. Phase composition of coating reinforced by particles MoB according to conditions of laser remelting, at the following parameter values: а – minimum; б – maximum

Присутствие боридов молибдена сделало покрытие более чувствительным к особенностям лазерного переплава. Во время нагрева лазерным лучом происходит изменение условий теплообмена и протекают химические реакции, которые приводят к увеличению коли-

чества железа и боридов хрома, а молибден переходит в свободное состояние.

Изменения в отношениях между α -Fe и γ -Fe приводят к изменениям в структуре дендритов, описанным выше. Присутствие боридов тантала в покрытии тоже воздействует на структуру. Для скорости лазерного луча 50 мм/мин дендритные компоненты сплава можно еще выделить, но при увеличении скорости до 100 мм/мин наблюдается квазиэвтектическая структура (рис. 3). Фазовый состав покрытия показан на рис. 6.

Присутствие боридов тантала делает покрытие более чувствительным к условиям лазерного оплавления. При изменении условий теплообмена в процессе нагрева лазерным лучом бориды хрома разрушаются, количество γ -Fe и комплекса V-Cr-B₄C карбидов возрастает и тантал появляется частично в свободном состоянии.

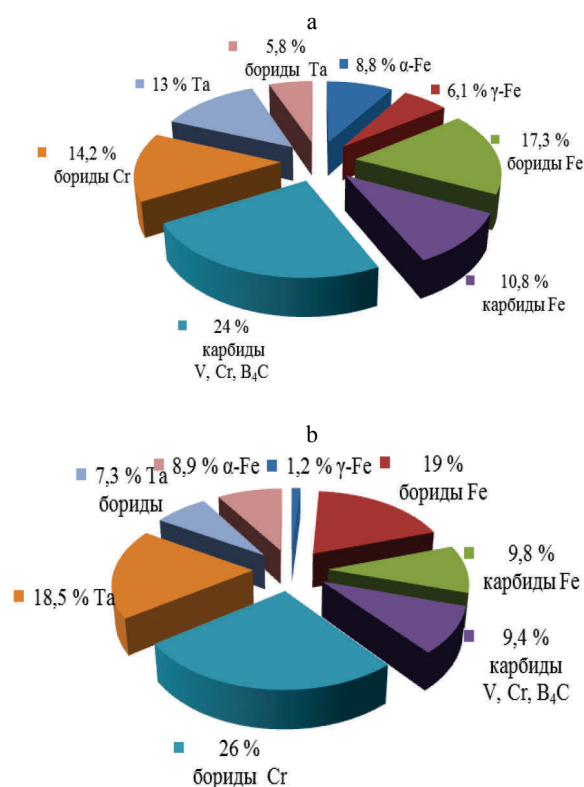


Рис. 6. Фазовый состав покрытия, армированного частицами TaB в зависимости от условия лазерного переплавления, при значении параметров: а – минимальном; б – максимальном

Fig. 6. Phase composition of coating reinforced by particles TaB according to conditions of laser remelting, at the following parameter values: а – minimum; б – maximum

Изменения износа покрытий со временем носят типичный характер: в течение 1–2 мин наблюдается время приработки, а затем появляется период равномерного износа (рис. 7). Самый высокий уровень износа наблюдается в покрытии, содержащем TaB. Для покрытий без легирования, а также содержащих B₄C и MoB скорость износа при более высоких нагрузках независимо от состава покрытия остается неизменной. При низких нагрузках легированные покрытия имеют определенные преимущества на начальной стадии цикла трения.

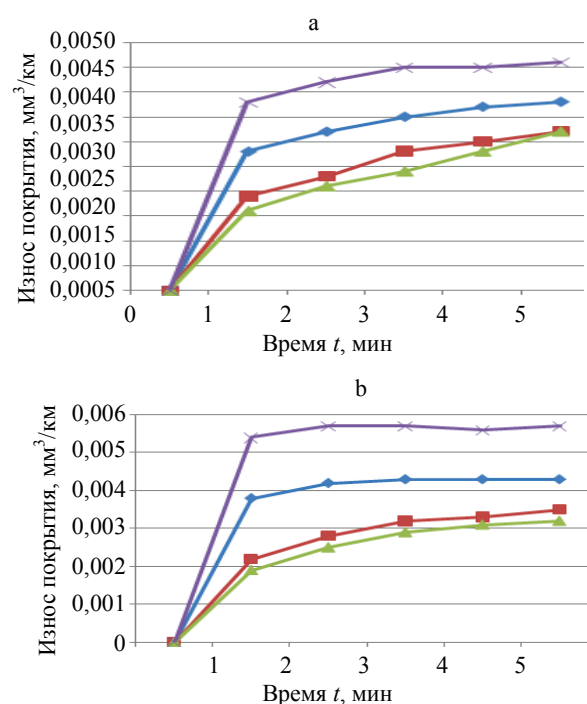


Рис. 7. Изменение скорости весового износа покрытия при скорости луча лазера $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с и коэффициенте перекрытия 0,8: а – нагрузка 30 Н; б – нагрузка 70 Н: —♦— MoB; —■— TaB; —▲— B₄C; —×— без легирования

Fig. 7. Changes in rate of weight coating wear at laser beam velocity $v_1 = 0.83 \cdot 10^{-3}$ m/sec and overlap ratio 0.8: а – load 30 Н; б – load 70 Н: —♦— MoB; —■— TaB; —▲— B₄C; —×— without alloying

С помощью уравнения регрессии (табл. 2) проведен анализ изменений параметров лазерного оплавления, состава покрытия и величины нагрузки на скорости износа оплавленных покрытий. При армировании покрытий порошками B₄C и MoB в исследуемом диапазоне нагрузок скорость оплавления не оказывает

влияния на скорость износа покрытия (рис. 7). В случае армирования твердыми частицами ТаВ скорость износа растет с увеличением скорости луча лазера. Рост диаметра лазерного пятна увеличивает износ при легировании В₄С и в случае легирования частицами ТаВ независимо от нагрузки.

Таблица 2

Уравнения регрессии, полученные для интенсивностей изнашивания покрытий, оплавленных лазером

Regression equations obtained for intensities of coating wear melted by laser

Легирующий элемент	Нагрузка, Н	Уравнение регрессии
Без легирования	30	$Y = 0,722 + 0,088x_1 + 0,1x_2 + 0,135x_3 + 0,08x_1x_3$
	70	$Y = 0,945 + 0,109x_1 + 0,111x_2 + 0,15x_3 + 0,108x_1x_3$
ТаВ	30	$Y = 0,753 + 0,09x_1 + 0,146x_2 + 0,088x_3 + 0,079x_1x_3$
	70	$Y = 0,862 + 0,098x_1 + 0,07x_2 + 0,13x_3$
МоВ	30	$Y = 0,571 + 0,142x_1 + 0,105x_2 + 0,203x_3 + 0,103x_1x_3$
	70	$Y = 0,795 + 0,172x_1 + 0,105x_2 + 0,245x_3 + 0,115x_1x_3$
В ₄ С	30	$Y = 0,571 + 0,142x_1 + 0,105x_2 + 0,203x_3 + 0,103x_1x_3$
	70	$Y = 0,6 + 0,05x_1 + 0,08x_2 + 0,093x_1x_3 + 0,11x_2x_3 + 0,1x_1x_2x_3$

Наименее износостойкими в условиях трения без смазочного материала являются покрытия после оплавления газовой ацетиленовой горелкой. Лазерное оплавление и легирование повышают износостойкость покрытий. Максимальная износостойкость по сравнению с оплавлением газовой ацетиленовой горелкой (примерно в три раза) достигается в покрытиях после лазерного легирования карбидом бора.

Параметры лазерного упрочнения оказывают влияние на интенсивность изнашивания. Наибольшее управляющее воздействие на интенсивность изнашивания оказывают диаметр луча лазера и коэффициент перекрытия.

Содержание в покрытии твердых армирующих частиц В₄С влияет на него следующим образом: увеличение скорости оплавления и диаметра лазерного пятна не влияет на износ

покрытия, повышение же коэффициента перекрытия приводит к снижению износа покрытия. Наличие твердых частиц ТаВ в покрытии и повышение скорости оплавления лучом лазера увеличивают его износ. Такая довольно сложная зависимость скорости износа покрытий от условий лазерного оплавления и износа обусловлена описанным выше комплексом структурных и фазовых превращений, которые способствовали формированию вторичных твердых включений и повысили микротвердость.

Сравнение значений скоростей износа для легированных и нелегированных покрытий показало преимущество армированных покрытий при скорости лазерного луча 50 мм/мин, диаметре лазерного луча 1,0 мм, коэффициенте перекрытия 0,8. Изменение в параметрах лазерной обработки может привести к увеличению износа: для порошка В₄С – в 1,2–1,25 раза, для МоВ – в 1,2–1,6 раза, для частиц ТаВ – в 2–3,3 раза.

ВЫВОДЫ

1. Для всех клеевых покрытий тенденция изменения в структуре одинаковая – от глобулярной до квазиэвтектической. Структура становится квазиэвтектической с ростом скорости сканирования лазерного луча.

2. В структуре покрытия, легированного МоВ, преобладают дендритные образования. При лазерном переплаве наличие частиц МоВ и ТаВ приводит к дополнительным химическим реакциям и фазовым изменениям в композиции покрытия. Наличие частиц В₄С не влияет на изменение фазового состава покрытия. Износ зависит от условий оплавления покрытия, значений нагрузки, а также от состава покрытия. Наилучшие результаты были достигнуты благодаря формированию равновесной твердой структуры при оплавлении лазерным лучом с малым диаметром и низкой скоростью лазерного луча.

ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильюшенко [и др.] / под общ. ред. А. Ф. Ильюшенко. Минск: Бестпринт, 2002. 480 с.

2. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплостойких покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. Минск: Беларус. навука, 2006. 363 с.
 3. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров / под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. 664 с.
 4. Яндимиркин, Е. М. Фазовый состав и структура поверхностных слоев конструкционных и инструментальных сталей при лазерном легировании карбидом бора / Е. М. Яндимиркин // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 3. С. 38–41.
 5. Vencel, A. Microstructures and Tribological Properties of Ferrous Coatings Deposited by APS (Atmospheric Plasma Spraying) on Al-Alloy Substrate / A. Vencel, M. Mrdak, I. Cvijović // FME Transactions. 2006. Vol. 34, No 3. P. 151–157.
 6. Microstructural Design of Hardfacing Ni–Cr–B–Si–C Alloys / I. Hemmati, [et al.] // Acta Materialia. 2013. Vol. 61, No 16. P. 6061–6070. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.06.048.
 7. Дьяченко, О. В. Перспективы получения покрытий системы Fe–Cr–B–Si лазерным модифицированием / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова, Ю. О. Девойно // Вестник Брестского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 12–15.
 8. Дьяченко, О. В. Изучение трибологических характеристик клеевых покрытий на железной основе с помощью симплекс метода / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова // Инженерия поверхности: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 25–27 окт. Брест: БГТУ, 2007. С. 33–37.
 9. Feldshtein, E. Structure, Phases and Tribological Behaviour of Fe-Based Self-Fluxing Alloy Coatings Formed by Plasma Spraying and Follow-Up Flame and Laser Remelting / E. Feldshtein, M. Kardapolava, O. Dyachenko // International Journal of Surface Science and Engineering. 2015. Vol. 9, No 5. P. 395–406. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2015.072059.
 10. Improvement of the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel by Laser Surface Alloying / B. Abdolahi [et al.] // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257, No 23. P. 9921–9924. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.06.108.
- Поступила 09.03.2017
Подписана в печать 19.05.2017
Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Il'yushchenko, A. F., Okovityi, V. A., Kundas, S. P., Formanek, B. (2002) *Formation of Gas and Thermal Coatings: Theory and Practice*. Minsk, Bestprint. 480 (in Russian).

2. Vityaz P. A., Il'yushchenko A. F., Shevtsov A. I. (2006) *Fundamentals on Deposition of Wear-Resistant, Corrosion-Resistant and Heat-Resistant Coatings*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 363 (in Russian).
3. Grogoryants A. G., Shiganov I. N., Misiourov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 664 (in Russian).
4. Yandimirkin E. M. (2006) Phase Composition and Structure of Surface Layers of Constructional and Instrument Steel During Laser Doping with the Help of Boron Carbide. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, (3), 38–41.
5. Vencel A., Mrdak M., Cvijović I. (2006) Microstructures and Tribological Properties of Ferrous Coatings Deposited by APS (Atmospheric Plasma Spraying) on Al-Alloy Substrate. *FME Transactions*, 34 (3), 151–157.
6. Hemmati I., Huizenga R. M., Ocelík V., De Hosson J. T. M. (2013) Microstructural Design of Hardfacing Ni–Cr–B–Si–C Alloys. *Acta Materialia*, 61 (16), 6061–6070. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.06.048.
7. Dyachenko O. V., Kardapolova M. A., Devoyno Yu. O. (2005) Prospects for Obtaining Coatings of System-Fe–Cr–B–Si while Using Laser Modification. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Brest State Technical University], (4), 12–15 (in Russian).
8. Dyachenko O. V., Kardapolova M. A. (2007) Study of Tribological Characteristics for Adhesive Iron-Based Coatings with the Help of Simplex Method. *Inzheneriya Poverkhnosti: sb. tr. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Brest, 25–27 okt.* [Surface Engineering: Collected Papers of International Scientific and Technical Conference. Brest, October 25–27]. Brest, Brest State Technical University, 33–37.
9. Feldstein E., Kardapolova A., Dyachenko O. (2015) Structure, Phases and Tribological Behaviour of Fe-Based Self-Fluxing Alloy Coatings Formed by Plasma Spraying and Follow-Up Flame and Laser Remelting. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 9 (5), 395–406. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2015.072059.
10. Abdolahi B., Shahverdi H. R., Torkamany M. J., Emami M. (2011) Improvement of the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel by Laser Surface Alloying. *Applied Surface Science*, 257 (23), 9921–9924. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.06.108.

Received: 09.03.2017

Accepted: 19.05.2017

Published online: 29.01.2018