

тивации рабочих поверхностей и формирует структуру, обеспечивающую при последующем электроискровом легировании перераспределение элементов с возрастанием количества карбидов хрома (до 60%) в приповерхностном слое и степени легированности твердого раствора хромом и вольфрамом, образованием достаточно совершенной кристаллографической текстуры с повышением плотности дислокаций.

Предварительное упрочнение рабочей поверхности лазерной обработкой способствует усилению диффузионных процессов и насыщению карбидами хрома твердосплавного покрытия.

В результате последующего электроискрового легирования у поверхности образуется слоистая износостойкая зона глубиной 250...450 мкм с максимальной микротвердостью у поверхности до 16 ГПа и высокой микротвердостью по глубине слоя до 11...12 ГПа

Сочетание же электроискрового легирования и электромагнитной обработки значительно снижает шероховатость поверхности. Комбинирование перечисленных способов обеспечивает повышение качества и эффективности обработки.

#### Литература

1. Ящерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле, - Мн.: Наука и техника, 1988. - 272с.
2. Марочник сталей и сплавов/В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина, - М.: Машиностроение, 1989, - 640 с.
3. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головки Л.Ф., Подчерняева И.А. Лазерное и электроэрозсионное упрочнение материалов. - М.: Наука, 1986. - 276с.
4. Девойно О.Г., Яковлев Г.М. О поверхностном упрочнении стали 40Х13 лазерным лучом. - В кн.: Машиностроение, 1983, вып.8, с.127-128.

УДК. 621.891:621.793

### ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛЕЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ С ПОМОЩЬЮ СИМПЛЕКС МЕТОДА.

Дьяченко О.В., Кардаполова М.А.

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

**Введение.** Сплавы системы Fe-Cr-B-Si обладают высокой структурной чувствительностью к энергетическому воздействию и легирующим добавкам [1]. Лазерное модифицирование позволяет точно дозировать подвод энергии и легирующих веществ, а характер получаемой структуры определяет качество упрочненного слоя. Кроме того, сплавы обладают высокой износостойкостью вследствие композиционной структуры.

Широко известен способ получения износостойких покрытий сочетанием плазменного напыления с последующим лазерным оплавлением [1; 2]. Этот метод весьма успешно рекомендовал себя при изготовлении и восстановлении длинномерных, крупногабаритных деталей и деталей сложной конфигурации. Однако данная технология достаточно затратная. Нами была предпринята попытка замены плазменных покрытий на клеевые.

В технологии получения порошковых многокомпонентных материалов и изделий из них часто приходится решать задачи поиска оптимальных вариантов материалов, в частности путем выбора соответствующего соотношения исходных компонентов.

Для решения задачи выбора оптимального качественного, а впоследствии и количественного состава многокомпонентной обмазки, использовали метод математического моделирования на симплексных решетках Шеффе [3].

Целью работы является изучение влияния лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость, износостойкость клеевых покрытий системы Fe – В – Cr – Si.

**Методика.** Для исследования микроструктуры, микротвердости и сравнительных испытаний на износ использовали образцы из стали 45 прямоугольной формы сечением 10 x 10 и длиной 30 мм, на поверхность которых кистью наносили пасту, которую готовили смешиванием трех компонентов: клея «АГО», ацетона и порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф. Далее выдерживали на воздухе при комнатной температуре 1 час для полного удаления растворителя из клеевого слоя. Толщина слоя составляла 0.6 мм. Оплавление осуществили непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью  $N = 800$  Вт при диаметре лазерного луча  $d = 3,0 \times 10^{-3}$  м, скоростями движения детали относительно луча лазера (скоростями луча лазера):  $V_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_4 = 5 \cdot 10^{-3}$  м/с, с коэффициентом перекрытия 0.8 после предварительного нанесения порошковых обмазок  $V_4C$ , ТаВ, МоВ на клеевой связке (3% клея «АГО» в ацетоне). Содержание легирующих элементов в обмозке выбрали исходя из матрицы планирования, соответственно, в долях единицы: 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.

Микрошлифы травили в 5-% растворе пикриновой кислоты в спирте, затем в 5-% растворе азотной кислоты в спирте.

Протравленные образцы изучены на световом металлографическом микроскопе «Unimet» (Япония) при увеличении X 400.

Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3.

Для ускоренных сравнительных испытаний материалов на износ при сухом трении использовали машину трения МТ – 1 при линейной скорости вращения истирающего диска 2.3 м/с (угловой 880 об/мин), нагрузке Р (30 – 70 Н), твердости диска 40 – 45 HRC. Время эксперимента – 300 с.

По результатам проведенных экспериментов (по формуле 1) вычислены интенсивности изнашивания для каждого случая.

$$I_h = \frac{\Delta V}{A_T \cdot L_T} = \frac{A_T \cdot h}{A_T \cdot L_T} = \frac{H}{L_T} = \frac{b^2}{8 \cdot r \cdot L_T} \quad (1)$$

где  $I_h$  – интенсивность изнашивания пары трения,  $A_T$  – площадь поверхности трения,  $L_T$  – путь трения,  $b$  – длина лунки,  $r$  – ее радиус.

Математическая обработка полученных интенсивностей изнашивания проведена с помощью симплекс-метода.

Исследуемая система содержала 3 варьируемых компонента (многокомпонентная обмозка состояла из ТаВ, МоВ и  $V_4C$ ). Поэтому в качестве симплекса использовали модели третьего порядка.

1 серия опытов состояла из 9 основных опытов, вторая – из 9 основных и одного дополнительного опытов. Полученная модель учитывала взаимодействие факторов:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i=1}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^q \gamma_i (x_i - x_i) + \sum_{i=1}^q \delta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2)$$

$Y_i$  – параметры оптимизации,  $x_i$  – варьируемые факторы,  $\beta_i$  – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметры оптимизации,  $q$  – количество компонентов,  $x_i = (z_i)$  – кодированные уровни содержания компонентов.

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) определяли пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых принято содержание легирующих элементов в обматке (таблица 1):

$x_1 = z_1$  — содержание В<sub>4</sub>С,  $x_2 = z_2$  — содержание ТаВ,  $x_3 = z_3$  — содержание МоВ.

Коэффициенты уравнения (1) определяли по формулам:

$$\beta_1 = Y_1 \quad \beta_2 = Y_2 \quad \beta_3 = Y_3 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_{12} &= \frac{9}{4}(Y_{112} + Y_{122} - Y_1 - Y_2) \\ \beta_{13} &= \frac{9}{4}(Y_{113} + Y_{133} - Y_1 - Y_3) \\ \beta_{23} &= \frac{9}{4}(Y_{223} + Y_{233} - Y_2 - Y_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{12} &= \frac{9}{4}(3Y_{112} - 3Y_{122} - Y_1 - Y_2) \\ \gamma_{13} &= \frac{9}{4}(3Y_{113} - 3Y_{133} - Y_1 - Y_3) \\ \gamma_{23} &= \frac{9}{4}(3Y_{223} - 3Y_{233} - Y_2 - Y_3) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\beta_{123} = 27 Y_{123} - \frac{27}{4} (Y_{112} + Y_{122} + Y_{133} + Y_{223} + Y_{233}) + \frac{9}{2} (Y_1 + Y_2 + Y_3) \quad (6)$$

**Обсуждение результатов.** Наличие во всех покрытиях железной матрицы обусловило одинаковые закономерности влияния лазерной обработки на структуру и микротвердость полученных покрытий.

У всех клеевых покрытий, оплавленных лучом лазера, как без легирования, так и после комплексного легирования ТаВ, МоВ, В<sub>4</sub>С установлена одинаковая тенденция изменения структуры. Она изменялась от литой равновесной до мелкой квазиэвтектической.

На рисунке 1 показаны структуры оплавленных лазером клеевых покрытий без легирования при различных скоростях луча лазера.

При увеличении скорости луча лазера структура покрытия претерпела следующие изменения: литая равновесная, дендритная, квазиэвтектическая боридная. С увеличением скорости луча лазера уменьшается время, в течение которого происходит проплавление покрытия. Вследствие этого образуется пересыщенный раствор, из которого при остывании покрытия выпадают бориды и карбиды в виде квазиэвтектики.

При скорости луча лазера  $V_1$  (рисунок 1 а) образовалась литая равновесная структура с вкраплениями дендритов, форма которых приближена к глобулярной. Это свидетельствует о достаточно долгом пребывании покрытия в зоне лазерного облучения, приведшем к перераспределению элементов.

С увеличением скорости до  $V_2$  (рисунок 1 б) наблюдалась структура с ориентированными под углом 45° в направлении теплоотвода дендритами 1-го и 2-го порядка.

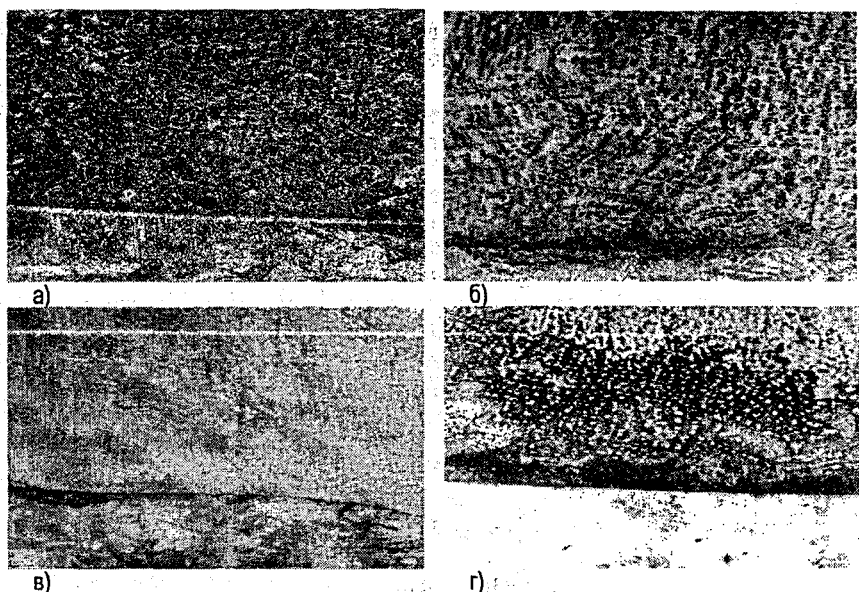


Рисунок 1. Микроструктура покрытий, полученных оплавлением клеевого покрытия из порошка ПР-Х4Г2РАС2Ф, при скоростях луча лазера: а)  $V_1 = 0.83 \cdot 10^3$  м/с, б)  $V_2 = 1.67 \cdot 10^3$  м/с, в)  $V_3 = 3.33 \cdot 10^3$  м/с, г)  $V_4 = 5 \cdot 10^3$  м/с

Дальнейший рост скорости луча лазера до  $V_3$  (рисунок 1 в) привел к образованию пересыщенного твердого раствора, из которого выделились мелкодисперсные бориды и карбиды неправильной формы.

Увеличение скорости луча лазера до  $V_4$  (рисунок 1 г) сократило время проплавления покрытия, вследствие чего из твердого раствора образовалась мелкодисперсная структура, состоящая из мелких карбидов и боридов. Образовавшаяся при данной скорости более темная переходная зона говорит о недостаточном проплавлении покрытия с основой.

Характерна общая тенденция изменения микротвердости клеевого покрытия, оплавленно-го без легирования – с повышением скорости луча лазера с  $V_1 = 0.8 \cdot 10^3$  м/с до  $V_5 = 5 \cdot 10^3$  м/с она возрастает с 7.65 до 8.5 ГПа.

Таблица 1. Матрица и результаты замеров интенсивности изнашивания пары трения

№	V4C	TaB	MoB	Y <sub>i</sub>	$I_h \cdot 10^{-7}$	$I_h \cdot 10^{-7}$	$I_h \cdot 10^{-7}$	H <sub>и</sub> , ГПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>		При P=30Н	При P=50Н	При P=70Н	
1.	1.00	0	0	Y <sub>1</sub>	0.41	0.44	0.87	7.8
2.	0	1	0	Y <sub>2</sub>	0.52	0.56	0.92	12.14
3.	0	0	1	Y <sub>3</sub>	0.38	0.60	0.64	10.83
4.	2/3	1/3	0	Y <sub>112</sub>	0.34	0.52	0.64	9.57
5.	1/3	2/3	0	Y <sub>122</sub>	0.65	0.69	0.71	10.54
6.	2/3	0	1/3	Y <sub>113</sub>	0.49	0.57	0.79	8.75
7.	1/3	0	2/3	Y <sub>133</sub>	0.42	0.65	0.69	8.99
8.	0	2/3	1/3	Y <sub>223</sub>	0.32	0.65	0.79	8.04
9.	0	1/3	2/3	Y <sub>233</sub>	0.57	0.61	0.79	10.18
10.	1/3	1/3	1/3	Y <sub>123</sub>	0.79	0.89	0.94	10.78

Изучено влияние количества веществ-упрочнителей в обмозке на интенсивность изнашивания и микротвердость (таблица 1), получены уравнения регрессии (таблица 2). Определен самый износостойкий состав обмозки для лазерного легирования клевого покрытия, содержащий 2/3 В<sub>4</sub>С и 1/3 ТаВ.

Таблица 2. Уравнения регрессии для клеевых покрытий легированных составом ТаВ+МоВ+В<sub>4</sub>С

Нагрузка, Н	Уравнения регрессии	Интенсивность изнашивания
30	$y_3 = 0.41x_1 + 0.52x_2 + 0.38x_3 + 0.135x_1x_2 + 0.27x_1x_3 - 0.023x_2x_3 - 1.85x_1x_2(x_1 - x_2) + 0.405x_1x_3(x_1 - x_3) - 2.003x_2x_3(x_2 - x_3) + 11.7x_1x_2x_3$	0.337
50	$y_5 = 0.44x_1 + 0.56x_2 + 0.6x_3 + 0.473x_1x_2 + 0.405x_1x_3 + 0.225x_2x_3 - 0.877x_1x_2(x_1 - x_2) - 0.18x_1x_3(x_1 - x_3) + 0.36x_2x_3(x_2 - x_3) + 10.17x_1x_2x_3$	0.518
70	$y_7 = 0.87x_1 + 0.92x_2 + 0.64x_3 - 0.99x_1x_2 - 0.0675x_1x_3 + 0.045x_2x_3 - 0.36x_1x_2(x_1 - x_2) + 0.158x_1x_3(x_1 - x_3) - 0.63x_2x_3(x_2 - x_3) + 11.88x_1x_2x_3$	0.64
Микротвердость, ГПа	$Y = H_{\mu} = 12.14x_1 + 9.67x_2 + 8.04x_3 - 0.3x_1x_2 + 1.8x_1x_3 + 0.54x_2x_3$	$H_{\mu} \max = 12.14$

Во всех случаях интенсивность изнашивания зависит от скорости луча лазера, диаметра луча и коэффициента перекрытия лазерных дорожек и возрастает с увеличением нагрузки.

### Выводы

С повышением скорости луча лазера структура клевого покрытия, оплавленного лучом лазера изменяется от литой равновесной до пересыщенной квазизвтектической. Такое изменение микроструктуры влияет на микротвердость, которая увеличивается с 7.65 до 8.5 ГПа.

Микротвердость клеевых покрытий после комплексного легирования составом ТаВ+МоВ+В<sub>4</sub>С по расчетным данным, достигает максимальных значений в составе, целиком состоящем из карбида бора.

Оптимальным составом, обеспечивающим минимальную интенсивность изнашивания клеевых покрытий, является состав, включающий в себя 2/3 В<sub>4</sub>С и 1/3 ТаВ.

Нет строгой корреляции между твердостью и интенсивностью изнашивания покрытий после лазерного легирования клеевых покрытий. Это говорит о том, что упрочнение происходит не только за счет увеличения карбида-боридной фазы, но и за счет упрочнения матрицы.

### Литература

1. Спиридонова И. М. Структура и свойства железоборуглеродистых сплавов / Металловедение и термическая обработка металлов. - 1984. - № 2. - С. 58 - 61.
2. Витязь П. А., Ивашко В. С., Ильющенко А. Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. - Минск: Беларуская навука, 1998.
3. Зедгидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. - М.: Наука, 1976. - 391 с.