

нов, В.И., Колганов, А.В., Сахоненко, В.М., Сахоненко, С.В. Сдвиговые перемещения нитей в неотвержденных тканых композитах под действием внешних нагрузок // Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.; НТИЦ «Информтехника». – Вып. 1(134) – 2 (135), 2004, С.51-55. 4. Сахоненко, С.В. Процессы растяжения и сжатия в материале препрегов при проколе отверстий // БГУ – Минск, 2004 – Деп. в ГУ «БелИСА» 10.03.2005 - №Д200576.

УДК 621. 793. 74

*Дорожкин Н.Н., Кардаполова М.А., Дьяченко О.В.,
Абрамович Т.М., Донских С.А., Симонов Ю.А.*

ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe-Cr-B-Si ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ И ЛЕГИРОВАНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь
Таганрогский педагогический институт,
Таганрог, Россия*

Сплавы системы Fe–Cr–B–Si обладают высокой структурной чувствительностью к энергетическому воздействию и легирующим добавкам [1, 2]. 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 – 4]. Этот метод весьма успешно зарекомендовал себя при изготовлении и восстановлении длинномерных, крупногабаритных деталей и деталей сложной конфигурации. Однако данная технология достаточно затратная.

Покрытия после лазерного оплавления обладают высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств. Для сравнения часть образцов подвергали лазерному оплавлению после клеевого метода нанесения покрытий.

Покрытия, нанесенные на деталь, в процессе эксплуатации подвергаются воздействию механических нагрузок, а адгезионная прочность лимитирует их применение. Лазерная обработка клеевых покрытий позволяет повысить прочность сцепления покрытия с основой при максимальном сохранении исходной структуры и свойств порошка. Для оценки работоспособности изделия подвергаются испытаниям на отрыв по ГОСТ 14760-69 «Метод определения прочности при отрыве».

Цель настоящей работы – исследовать адгезионную прочность и фазовый состав покрытий из самофлюсующихся сплавов на железной основе (клеевых и после плазменного напыления, оплавленных лазером и горелкой).

В качестве материала для нанесения клеевых покрытий и напыления использовали самофлюсующийся сплав из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф следующего химического состава (в %): Fe (83.1 – 87.6), В (3.3 – 4.3), Cr (3.5 – 4.5), Si (2.0 – 2.5), Mn (2.0 – 2.5), С (1.0 – 1.2), V (0.5 – 0.9), Al (0.05 – 0.5), Cu (0.05 – 0.5). На подготовленную поверхность штифтов клеевым способом его наносили кисточкой (в порошковый слой для клеевого покрытия добавлено 3% клея «АГО» к ацетону), а также методом плазменного напыления [1] с использованием установки УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазмотроном ПП-25 на режимах: $I = 20$ А, $U = 80$ В, $P = 0.06$ ГПа. Толщина слоя составляла 0.6 мм. Далее на плазменно-

напыленный слой наносилось поглощающее покрытие (желтая гуашь). При клеевом методе вместо него использовалась легирующая обмазка на основе карбида бора.

Оплавление осуществляли непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре пятна лазерного луча от $d_l = 1.0 \cdot 10^{-3}$ м до $d_l = 3.0 \cdot 10^{-3}$ м со скоростями перемещения $V_1 = 50$ мм/мин, $V_2 = 100$ мм/мин, $V_3 = 150$ мм/мин, $V_4 = 200$ мм/мин, $V_5 = 300$ мм/мин и коэффициентами перекрытия $k_{пер} = 0.8$ и $k_{пер} = 1.2$ с целью получения единого фазового состава и заданных свойств по всей толщине покрытия.

Исследования адгезионной прочности проводились на разрывной машине «RIENLE» с плавно изменяющимся усилием от 0 до 50000 Н на штифтах из стали 40Х, вставленных один в другой и притертых друг к другу. Торцы конусов представляют собой концентрические кольца. Диаметр меньшего конуса 12 мм, большего 20 мм. Такая конструкция штифтов позволяет получить более однородный отрыв.

В случае лазерного легирования клеевых покрытий карбидом бора режимы оплавления подбирали, а полученные данные исследовали одним из методов математического планирования – методом полного факторного эксперимента [5].

Поскольку число варьируемых параметров невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов $Q = 2$ в степени, соответствующей числу факторов n , позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами 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 8 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 параметры 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) (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость σ_c от режимов обработки

№ образца	Вид, режимы обработки и код			σ_c МПа
	X_1	X_2	X_3	
	Клеевое покрытие, оплавленное лазером			
1	50	1	0.8	92
2	150	1	0.8	67
3	50	3	0.8	73
4	150	3	0.8	53
5	50	1	1.2	76
6	150	1	1.2	58
7	50	3	1.2	70
8	150	3	1.2	42
	Плазменное покрытие без оплавления			
13	–	–	–	31
	Плазменное покрытие, оплавленное лазером			
9	50	1	0.8	156
10	100	1	0.8	129
11	300	1	0.8	113
12				142
	Плазменное покрытие, оплавленное горелкой			

Для оценки достоверности результатов и адекватности модели повторные опыты проводили трижды на основном уровне с использованием карбида бора в качестве упрочняющей добавки.

Параметром оптимизации служила прочность сцепления покрытия и основы Y .

Рентгеновские съемки производились на дифрактометре ДРОН 3.0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении в максимально возможном интервале углов от 10° до 75° для качественного и количественного фазового анализа.

Фактором, лимитирующим прочность сцепления газотермических покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе железа, является раскисление окисных пленок между покрытием и подложкой и установление химических связей. Время, необходимое для раскисления оксидов железа при $T = 1300 - 1500$ К, составляет $0.75 - 0.9$ с [6].

В процессе исследования наблюдался адгезионный и адгезионно-когезионный характер разрывов образцов (когда покрытие отрывалось полностью либо часть его оставалась на штрифте, причем первый случай характерен для больших скоростей сканирования луча лазера).

Разрушение покрытия начинается с торцов [7], где меньше толщина клеевого слоя и существуют дефекты, т. е. нет удовлетворительного контакта клея с материалом. В этих местах концентрируются значительные напряжения. При увеличении нагрузки в них возникают микротрещины, которые постепенно распространяются к центру склеивания. Когда число микротрещин достигает определенного уровня, создаются условия для их соединения в трещину значительных размеров, что приводит к разрушению.

Для покрытий, напыленных плазмой без легирования, максимальное значение $\sigma_c = 156$ МПа наблюдается при минимальной скорости движения луча лазера $v_1 = 50$ мм/мин (см. табл. 2, образец № 9), с повышением скорости луча относительно детали до $v_5 = 300$ мм/мин $\sigma_c = 113$ МПа (образец № 11). Это связано с сокращением времени нахождения детали в зоне лазерного нагрева.

Минимальное значение $\sigma_c = 31$ МПа наблюдается у покрытий, напыленных плазмой без плавления, из-за наличия пор и большого количества окисных пленок (образец № 13).

Что касается клеевых покрытий, легированных B_4C , то наибольшая прочность сцепления покрытия и основы σ_c наблюдается при $V_1 = 50$ мм/мин, $d_l = 1$ мм и $k_{пер} = 0.8$, а именно 92 МПа (образец № 1). Покрытие находится в зоне воздействия луча лазера достаточно долго и успевает полностью проплавиться. С увеличением коэффициента перекрытия до 1.2 прочность сцепления снижается до 76 МПа (образец № 5). Это связано, по-видимому, с расфокусировкой луча.

При $v_1 = 50$ мм/мин, $d_l = 3$ мм и $k_{пер} = 0.8$ σ_c уменьшается до 73 МПа (образец № 3). Это связано, по-видимому, с уменьшением энерговклада. При той же скорости и том же диаметре луча лазера, но при увеличении коэффициента перекрытия до 1.2 (образец № 7) σ_c уменьшается до 70 МПа. С повышением скорости луча лазера относительно детали до 150 мм/мин при $d_l = 1$ мм и $k_{пер} = 0.8$ (образец № 2) σ_c снижается до 67 МПа. Это связано с тем, что время нахождения покрытия в зоне лазерного воздействия уменьшилось. При той же скорости и том же диаметре луча, но с увеличением коэффициента перекрытия до 1.2 (образец № 6), σ_c снижается до 58 МПа. При $V_3 = 150$ мм/мин, $d_l = 3$ мм и $k_{пер} = 0.8$ (образец № 4) σ_c уменьшается до 53 МПа. При максимальных значениях скорости, диаметра и коэффициента перекрытия $V_3 = 150$ мм/мин, $d_l = 3$ мм и $k_{пер} = 1.2$ (образец № 8) σ_c минимальна – 42 МПа.

Полученная адекватная модель поверхности отклика позволяет судить о степени влияния параметров $X_1 - X_3$ на адгезионную прочность Y при лазерном легировании клеевых покрытий.

$$Y = 67.458 - 9.708X_1 - 6.042X_2 - 5.958X_3 - 5.375X_1X_2. \quad (2)$$

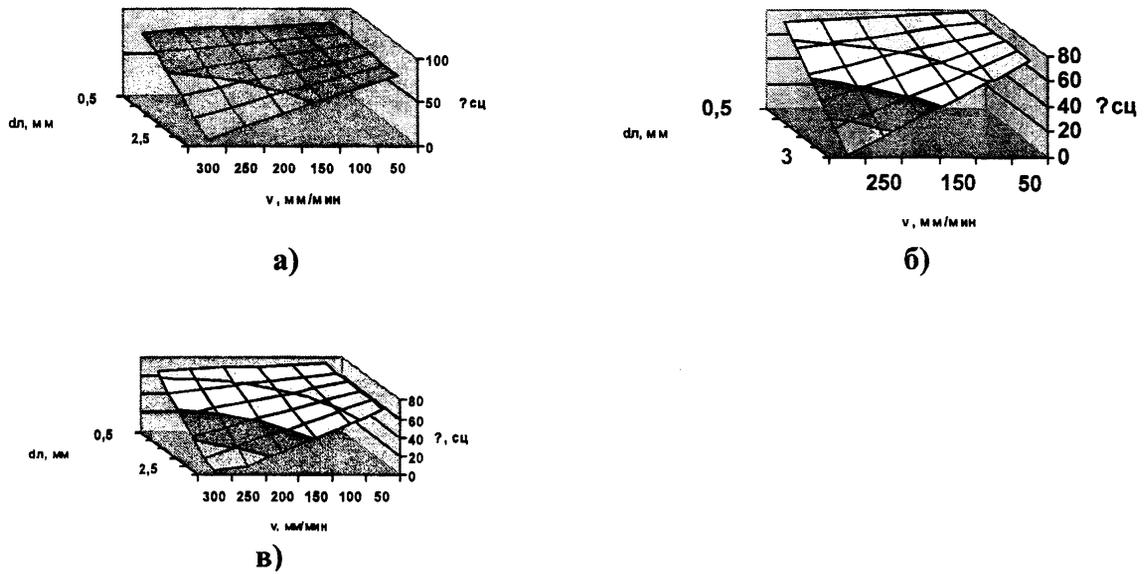


Рисунок 1 - Зависимости прочности сцепления покрытия после лазерного легирования В₄С:
 а) $k_{пер} = 0.8$, б) $k_{пер} = 1$, в) $k_{пер} = 1.2$

Построены зависимости прочности сцепления покрытия с основой после лазерного легирования В₄С от коэффициента перекрытия $k_{пер} = 0.8, 1.0$ и 1.2 (рис. 1). Отчетливо прослеживается зависимость адгезионной прочности для клеевых покрытий, легированных В₄С: с повышением скорости луча лазера σ_c уменьшается. При $V_1 = 50$ мм/мин время нахождения покрытия в зоне лазерного нагрева больше, покрытие проплавляется сильнее, что и вызывает повышение адгезионной прочности. При увеличении диаметра луча до 3 мм вследствие расфокусировки уменьшается энергозатраты, покрытие проплавляется слабее и σ_c меньше, чем при $d_l = 1$ мм. При обработке покрытий с коэффициентом перекрытия 0.8 из-за наложения лазерных дорожек одной на другую происходит дополнительный переплав покрытия, приводящий к увеличению σ_c . Для плазменных покрытий без оплавления σ_c наименьшая из-за трещин, крупных сфероподобных полостей и мелких пор, а также большого количества окисных пленок. У плазменных покрытий, оплавленных лазерным излучением, с уменьшением скорости обработки σ_c повышается. В случае испытаний плазменно-напыленных покрытий оплавленных горелкой, σ_c зависит от выбранных режимов оплавления и несколько меньше чем при оплавлении лучом лазера.

На свойства покрытий, как известно, оказывает влияние не только прочность сцепления, но и их фазовый состав, особенно количество упрочняющей фазы. Данные рентгеноструктурного анализа клеевых, плазменных покрытий после оплавления лазерным лучом и горелкой представлены в табл. 2 и 3.

Из таблиц видно, что с повышением скорости движения луча лазера, ростом диаметра луча и коэффициента перекрытия уменьшается количество боридов железа, а также адгезионная прочность σ_c .

Таблица 2. Состав фаз после нанесения клеевых покрытий и лазерного легирования В₄С.

Фазы	Номера образцов и режимы обработки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	$v_1=50$	$v_3=150$	$v_1=50$	$v_3=150$	$v_1=50$	$v_3=150$	$v_1=50$	$v_3=150$
	$d_l=1.0$	$d_l=1.0$	$d_l=3.0$	$d_l=3.0$	$d_l=1.0$	$d_l=1.0$	$d_l=3.0$	$d_l=3.0$
	$k_{пер} = 0.8$	$k_{пер} = 0.8$	$k_{пер} = 0.8$	$k_{пер} = 0.8$	$k_{пер} = 1.2$	$k_{пер} = 1.2$	$k_{пер} = 1.2$	$k_{пер} = 1.2$

Продолжение таблицы 2								
Бориды Fe	27.3	34.4	33.1	37.8	30.6	29.3	30.7	28.3
Карбид Fe	29.5	27.1	27.9	27.1	28.6	25.1	29.1	22.3
Карбиды	11.5	8.5	10.1	11.6	8.4	9.7	13.0	9.0
Бориды Cr	23.3	21.9	22.1	19.3	25.8	23.3	23.6	26.3
<i>H</i> , МПа	8.4	8.1	6.7	4.2	6.3	12.6	3.7	14.0
	1136	1313	1223	1210	1180	1285	1243	1386

Таблица 3. Состав фаз в зависимости от режимов обработки для оплавленных горелкой и лазером плазменных покрытий без легирования (при $d_l = 1.0$ мм, $k_{пер} = 0.8$)

Фазы	Номера образцов и режимы обработки			
	9	10	11	12
	Оплавленные лазером плазменные покрытия			Напыленное и оплавленное горелкой покрытие
	$v_1=50$	$v_2=100$	$v_3=300$	
Fe	56.2	55.7	55.8	27.6
Бориды Fe	13.9	14.9	14.0	16.8
Карбид Fe	7.1	7.5	7.6	10.4
Карбиды	12.7	14.5	15.6	27.0
Бориды	8.6	10.4	7.0	16.7
<i>H</i> , МПа	939	1050	1121	1015

Теорию прочности сцепления рассмотренных выше покрытий построим на основе следующих представлений: кинетика образования квазихимических сил [8] изучена исходя из модели, в соответствии с которой процессы протекают только в области, примыкающей к ленту расплава, протяженностью $\Delta x = d_l$ (см. рис. 2, 3). Положения лежащие в основе данной модели подробнее описаны в работе [9].

На рис. 3 показано, что константа скорости образования квазихимических связей K заметно отлична от нуля только в области пятна, поскольку экспоненциально зависит от температуры:

$$K = \frac{1}{\tau_a} \exp\left(-\frac{\Delta\Phi_a}{kT_k}\right), \quad \Delta\Phi_a = \Delta u_a - T\Delta S_a + P_e \Omega. \quad (3)$$

В (3) у нас $\frac{1}{\tau_a}$ – частота атомных колебаний в кристаллической решетке металла; k – постоянная Больцмана; T_k – температура в области контакта частиц покрытия с основой; $\Delta\Phi_a$ – изменение термодинамического потенциала Гиббса, отнесенное к атомному объему Ω , в котором согласно модельным представлениям [8, 9] протекает процесс образования прочных квазихимических связей между парами атомов M частицы покрытия и D подложки; Δu_a – соответствующее этому процессу изменение внутренней энергии; ΔS_a – изменение энтропии; P_e – внешнее давление в области контакта.

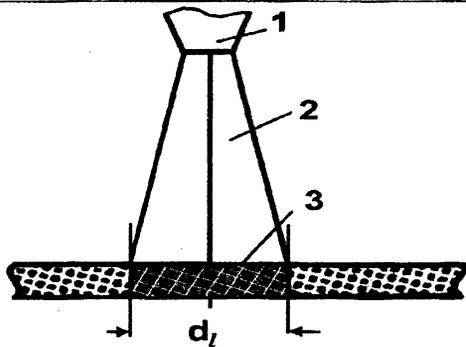


Рисунок 2 - Схема расположения луча лазера и оплавленного им покрытия: 1 - лазер; 2 - луч; 3 - расплав

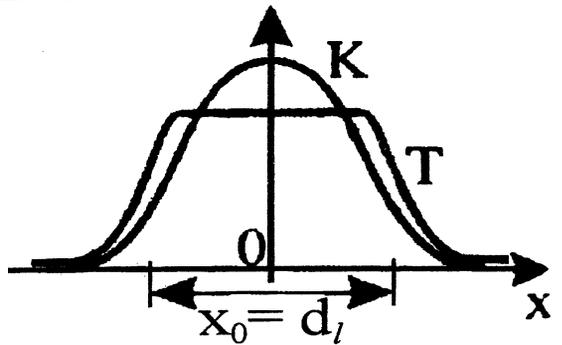


Рисунок 3 - Изменение константы скорости образования квазихимических связей в зависимости от координаты x лазера

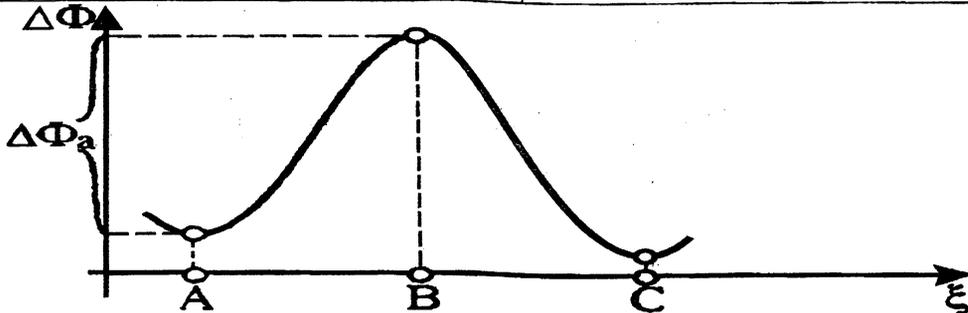


Рисунок 4 - Зависимость термодинамического потенциала Гиббса образования квазихимических связей от координаты реакции ξ

Для оценки температуры T в области пятна лазера можно воспользоваться величиной баланса тепловых потоков q_e от лазера и q_{Π} в покрытии.

Имеем:

$$q_e = \frac{N_{ef}}{\pi (d_l/2)^2}, \quad q_{\Pi} = \lambda \frac{T - T_0}{d_l/2}, \quad q_{\Pi} = q_e.$$

Из (4) следует, что

$$T = T_0 + \frac{2 N_{ef}}{\pi \cdot \lambda_{\Pi} \cdot d_l} = T_0 + T^0.$$

Для точной оценки температуры T_k в области контакта частиц с подложкой можно воспользоваться известным соотношением [8, 9]:

$$T_k = \frac{b_{\Pi} T + b_0 T_0}{b_{\Pi} + b_0}.$$

В (6) $b_{\Pi} = \sqrt{\rho_{\Pi} C_{\Pi} \lambda_{\Pi}}$, $b_0 = \sqrt{\rho_0 C_0 \lambda_0}$ - коэффициенты аккумуляции теплоты для покрытия и, соответственно, основы.

Сущность используемой нами модели [8, 9] состоит в следующем. В частицах покрытия атомы M за счет высокой температуры частиц (5) в области лазерного пятна находятся в активированном состоянии с ненасыщенными межуатомными связями, а атомы подложки D связаны попарно так, что на каждую пару атомов частицы $2M$ приходится пара D_2 связанных атомов в решетке металла подложки. Это состояние пар атомов $2M + D_2$ на рис. 4 представлено точкой A . Чтобы разорвать связь в паре D_2 системе атомов $2M + D_2$ требуется преодолеть потенциальный барьер $\Delta\Phi_a$ вдоль координаты реакции ξ . Активированному состоянию системы $2M + 2D$ отвечает рис. 4 точка B . Необходимая системе энергия активации $\Delta\Phi$ получается за счет тепловой флуктуации в системе при достаточно высокой температуре контакта (6). В системе атомов $2M + 2D$ становится возможным формирование прочных ква-

зихимических связей, и она переходит в состояние, показанное на рис. 4 точкой С. Имеем здесь состояние 2MD.

Сказанное соответствует топохимической реакции [8]:



Если ввести концентрацию C_{MD} связанных пар атомов частицы покрытия и подложки, то скорость протекания ее можно выразить уравнением:

$$\frac{d_1 C_{MD}}{dt} = (1 - C_{MD}) K. \quad (8)$$

В (8) константа скорости реакции (7) представлена уравнением (3). Учитывая, что реакция (7) протекает вдоль лазерного пятна, т.е. вдоль координаты x , как это показано на рис. 3, имеем:

$$\frac{dC_{MD}}{dt} = \frac{dC_{MD}}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dC_{MD}}{dx} V. \quad (9)$$

В выражении (3) можно приближенно принять, различая $\Delta\Phi_a$ по малым значениям ΔF_a $\approx t = x/V$:

$$\Delta\Phi_a \approx \Delta\Phi_0 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial F}\right)_0 \Delta F_a + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)_0 t. \quad (10)$$

$$\Delta\dot{E}_a = \frac{1}{2} \sigma_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta}. \quad (11)$$

Далее, как известно

$$\frac{\partial\Phi}{\partial F} = \sigma, \quad (12)$$

коэффициент поверхностного натяжения, для которого согласно [11] можно получить

$$\sigma = \sigma_0 - \sigma_1 C_B, \quad (13)$$

Интегрируя (8) с учетом разложения (10), имеем:

$$-\ln(1 - C_{MX}) \approx 2K_0 \operatorname{sh} \left(\frac{\Delta\dot{E}_a}{kT_k} \frac{d_1}{2V} \right) \cdot \frac{kT_k}{\Delta\dot{E}_a}. \quad (14)$$

Здесь положено:

$$K_0 = \frac{1}{\tau_a} \exp \left(- \frac{\Delta\Phi_a}{kT_k} - \frac{\sigma_0 \Delta F_a}{kT_k} - \frac{\sigma_1 C_B \Delta F_a}{kT_k} \right). \quad (15)$$

Далее можно принять, что $C_{MD} \ll 1$

$$-\ln(1 - C_{MD}) \approx C_{MD}, \quad (16)$$

а также разложить в ряд для малых значений аргумента:

$$2 \operatorname{sh} \left(\frac{\Delta\dot{E}_a}{kT_k} \frac{d_1}{2V} \right) \approx \frac{\Delta\dot{E}_a}{kT_k} \frac{d_1}{V} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta\dot{E}_a}{kT_k} \frac{d_1}{2V} \right)^3 + \dots \quad (17)$$

Представляется естественным положить [8] для прочности сцепления покрытия с основой

$$\sigma_c / \sigma_{\max} = C_{MD}. \quad (18)$$

Тогда находим окончательно:

$$\sigma_c \approx \sigma_{c \max} K_0 \left(\frac{d_1}{V} + \dots \right). \quad (19)$$

Полученное выражение отражает зависимость прочности сцепления от величин d_1 , V и \dot{E}_a , наблюдающуюся в эксперименте.

Выводы

1. Максимальное значение адгезионной прочности σ_c наблюдается у оплавленных лазером плазменных покрытий без легирования при минимальной скорости движения луча лазера относительно детали.

2. Для клеевых оплавленных лазером покрытий с повышением скорости луча лазера относительно детали от 50 мм/мин до 150 мм/мин, увеличением диаметра луча от 1 до 3 мм и

ростом коэффициента перекрытия от 0.8 до 1.2 количество боридов железа уменьшается : снижается адгезионная прочность σ_c .

3. Экспериментально и теоретически установлено, что увеличение концентрации бора C_B приводит к повышению адгезионной прочности и улучшению структуры границ зерен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов, В. П., Болотина, Н. П., Аргунова, Т. В., Тюнин, В. Д., Лебедев, Н. П. Влияние лазерной обработки на структуру и состав плазменно-напыленных покрытий систем Ni–Cr–B–Si–C // ФХОМ. 1987. № 1. С. 74 – 78. 2. Спиридонова, И. М. Структура и свойства железобороуглеродистых сплавов / Металловедение и термическая обработка металлов. 1984. № 2. С. 58 – 61. 3. Витязь, П. А., Ивашко, В. С., Ильющенко, А. Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий / Минск: Беларуская навука, 1998. 4. Ивашко, В. С., Куприянов, И. А., Шевцов, А. И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. Минск: Навука і тэхніка, 1996. 5. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металлловедении. Планирование промышленных экспериментов. М.: Машиностроение, 1971. 6. Гречихин, Л. И., Спиридонов, Н. В., Василенко, А. Г., Кардаполова, М. А., Девойно О. Г. Повышение адгезионной связи оплавленных лазерным излучением газотермических покрытий / ФХОМ. 1990. № 3. С. 76 – 81. 7. Трезно, М. С., Москалев, Е. В. Клей и склеивание. Л.: Химия, 1980. 8. Получение покрытий высокотемпературным расплавлением. Сб. статей. Под. ред. Л.К. Дружинина и В.В. Кудинова. М., Атомиздат, 1973. С. 32 – 35, 15–9. Dorozhkin, N.N., Abramovich, T.M., Donskikh, S.A. and other. Some aspects of electro-contact sticking theory of powdery coatings. Acta Technica Napocensis, series: machine construction materials. №47, Technical University of Cluj-Napoca. P. 75 – 79. 2004. 10. Dorozhkin, N.N., Abramovich, T.M., Donskikh, S.A. and other. Gas-flame coating theory for composite powdery materials. Prociding v.1, Third Int. Conf. on Powder Metallurgy RoPM 2005, Sinaia. P. 273–278. 11. Кунин, Л.П. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М., 1955.

Обозначения

A – площадь торцевой поверхности штифта, мм²;
 b_{OC} – коэффициент аккумуляции теплоты основы;
 $b_{П}$ – коэффициент аккумуляции теплоты для покрытия;
 B_{ij} – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметры оптимизации;
 C_B – концентрация бора в обмазке;
 C_{MD} – концентрация связанных атомов покрытия и подложки;
 C_{\square} – теплоемкость покрытия;
 d_l – диаметр луча лазера, мм;
 d – диаметр штифта мм;
 D – атомы подложки;
 ΔE_{∂} – часть энергии диссипирования пятна за счет скоростей и вязких деформаций, Дж;
 $\Delta \dot{E}_{\partial}$ – диссипация термодинамической энергии $\Delta \phi_a$ за счет вязких процессов в области пятна;
 H – микротвердость, МПа;
 I – ток дуги при плазменном напылении покрытий, А;
 K – константа скорости образования квазихимических связей;
 k – постоянная Больцмана;
 $k_{пер}$ – коэффициент перекрытия лазерных дорожек;
 M – атомы покрытия, находящиеся, за счет высокой температуры частиц в области лазерного пятна в активированном состоянии с ненасыщенными межуатомными связями;
 $2M$ – атомные комплексы, образуемые активированными атомами частиц покрытия;

$2MD$ – конечное состояние системы комплексов связанных атомов покрытия и подложки после преодоления потенциального барьера, при котором образуется прочная связь между частицами подложки и покрытия (точка С, рис. 4);

$2M + 2D$ – активированное состояние системы атомных комплексов, образуемое атомами покрытия и подложки на высоте потенциального барьера (точка В, рис. 4);

$2M + D_2$ – начальное состояние системы комплексов, образуемое разобщенными активированными атомами частиц покрытия и подложки (точка А, рис. 4);

N – мощность лазерной установки ЛГН-702, Вт;

N_{ef} – эффективная мощность лазерного излучения, передаваемая металлу;

n – число факторов;

P_e – внешнее давление в области контакта луча лазера и покрытия, ГПа;

P_n – давление плазмообразующих газов при напылении, ГПа;

P_0 – усилие, соответствующее моменту отрыва покрытия от штифта, ГПа;

Q – число опытов;

q_e – величина баланса тепловых потоков от лазера;

$q_{лп}$ – величина баланса тепловых потоков в покрытии

ΔS_a – изменение энтропии, в области присоединения покрытия и основы $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$;

ΔF_a – площадка активации, м^2 ;

T температура в области пятна

T – температура на границе покрытия и основы, К;

t – время движения луча лазера, с;

0

T – температура в центре пятна, К;

T_0 – начальная температура покрытия, 300К;

T_k – температура в области контакта покрытия и основы, К;

U – напряжение электрической дуги при плазменном напылении, В;

ΔU_a – изменение внутренней энергии в области присоединения покрытия и основы;

V – обобщенная скорость движения луча лазера относительно детали, мм/мин;

$V_1 = 50, V_2 = 100, V_3 = 150, V_4 = 200, V_5 = 300$ – скорости движения луча лазера относительно детали, мм/мин;

X_1 – скорость перемещения лазерного луча, мм/мин;

X_2 – диаметр луча лазера в месте соприкосновения с поверхностью материала, мм;

X_3 – коэффициент перекрытия лазерных дорожек;

$\Delta x = d_l$ – протяженность области, примыкающей к пятну расплава, м;

Y – параметр оптимизации адгезионной прочности;

Φ – термодинамический потенциал Гиббса;

$\Delta \Phi_a$ – величина потенциального барьера энергии Гиббса для активной области, в которой реализуются связи между атомами основы и частицами покрытия;

$\Delta \Phi_0$ – доля приращения термодинамического потенциала Гиббса без учета включений,

Гж;

Φ – диссипативная функция, Вт;

Ω – атомный объем;

$\pi(d_l/2)$ – площадь пятна лазерного луча;

$\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$ – тензор скорости вязких деформаций в металле;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/см·град;

λ_0 – теплоемкость подложки.

$\lambda_{лп}$ – коэффициент теплопроводности покрытия;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м²;

$\sigma_{\alpha\beta}$ – тензор вязких напряжений, Па;

σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения без учета примеси бора, Дж/м²;

σ_{\max} – максимальная прочность сцепления покрытия и основы, МПа;
 σ_c – прочность сцепления покрытия и основы, МПа;
 τ – время, в течение которого луч лазера проходит отрезок, равный его диаметру, с;
 $1/\tau_a$ – частота колебаний атомов в решетке кристалла.
 ρ_0 – плотность материала подложки;
 ρ_{Π} – плотность покрытия;
 ξ – координата реакции;

Индексы: В – бор; ef – эффективный; ij – номер коэффициента модели (совпадает с порядковым номером); max – максимальный; ∂ – диссипация; a – активация; e – внешний; l – луч лазера; MD – прочная связь между атомами подложки и покрытия; н – напыление; нас – насыщенный; ос – основа; п – покрытие; пер – перекрытие; с – сцепление покрытия и основы; ш – штифт; $\alpha, \beta = 1, 2, 3$ – индексы координатных осей в тензорах напряжений и скоростей деформации; по этим индексам выполняется суммирование.

УДК 621.891

Кравчук А.С., Чигарев А.В.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ СУБШЕРОХОВАТОСТИ¹

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение. Разработка моделей деформирования многоуровневой шероховатости является одним из активно развивающихся областей физики [3, 4]. Много исследований посвящено решению задачи деформации многоуровневой шероховатости с помощью метода конечных элементов или созданию альтернативных теорий [4].

Однако не было уделено достаточного внимания теории Демкина-Крагельского для решения этой проблемы. Эта теория позволяет получить аналитическую зависимость относительных сближений от давлений для шероховатой поверхности [1].

Решение контактной задачи о совместной деформации шероховатости и субшероховатости, моделируемой основанием Винклера получено на основе теории Демкина-Крагельского.

Основные гипотезы, используемые при решении задачи о деформировании шероховатости без учета субшероховатости. Рассматривается контакт двухуровневой шероховатости и твердой гладкой поверхности. Шероховатость представляется сферическими сегментами с радиусами, имеющими некоторый разброс. Так радиус R_i имеет относительную частоту появления ω_i^{radius} .

Начальную часть опорной поверхности будем аппроксимировать степенной функцией в системе координат, связанной с наивысшим выступом:

$$\eta_s(\varepsilon) = b \varepsilon^\lambda, \quad (1)$$

¹ Исследования выполнены в соответствии с грантом INTAS (YS grant Ref. N 03-55-1894)