

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Технологический процесс получения качественного покрытия включает термическую обработку напыленных покрытий, необходимую для раскисления окисных пленок и высокой адгезионной прочности покрытия с основой. Использование лазерного излучения с высокой плотностью энергии позволяет управлять структурой сплава и облегчает ввод легирующих компонентов. Структура сплавов системы Ni-Cr-B-Si в основном состоит из фаз: g-Ni (пластичная матрица), Ni₃B (входит в состав легкоплавкой эвтектики g-Ni + Ni₃B), Cr₂B, Cr₇C₃ (упрочняющие фазы), которые выделяются в виде отдельных включений, эвтектик, дендритных ветвей, квазиэвтектик. В отличие от объемной термообработки, высокие скорости нагрева и охлаждения под воздействием лазерного луча способствуют получению тонкодифференцированных эвтектик, армирующих сплав /1/. Достигается высокая степень совершенства аксиальной текстуры в направлении (111), оказывающей влияние на трибологические характеристики поверхностного слоя. Исследованиями установлено, что усиливая ту или иную составляющую сплава с помощью легирования, можно значительно варьировать свойствами покрытия.

На поверхность образцов из стали 45 методом плазменного напыления наносили покрытие ПГ-СРЗ. После напыления поверхность покрывали слоем легирующей обмазки со связующим веществом. Последующее оплавление двухслойного покрытия осуществляли лазерным лучом /2/. Использовали CO₂-лазер непрерывного действия мощностью 800 Вт.

Цель исследования состояла в том, чтобы с помощью метода математического планирования экспериментов статистически достоверно определить направления и степени влияния наиболее важных параметров технологии лазерной обработки на характеристики покрытий, полученных методами лазерного оплавления газотермических покрытий с модификацией на стадии лазерного оплавления. Составы легирующих обмазок приведены в табл. 1.

Технологические факторы выбирали, исходя из соображений управляемости (т.е. возможности изменять их при условии надежного измерения их величин и изменений) и ортогональности (т.е. взаимной независимости):

фактор 1 — скорость перемещения лазерного луча;

Таблица 1
Составы легирующих обмазок для лазерного модифицирования
газотермических покрытий

№ №	Содержание компонентов, % по массе				Достижимые параметры физико-механических и эксплуатационных характеристик
	В аморфный	Mn	B ₄ C	Cr, Cr ₂ O ₃	
1.	30	-	70	-	Повышение износостойкости в условиях сухого трения
2.	50	-	-	50	Повышение износостойкости при граничном трении со смазкой

фактор 2 — диаметр луча лазера в месте соприкосновения с поверхностью металла («диаметр пятна»);

фактор 3 — коэффициент перекрытия дорожек, т. е. отношение шага обработки (расстояния между средними линиями дорожек) к диаметру пятна.

Таким образом, при величине фактора 3, меньше единицы, имеет место двукратное воздействие лазерного луча на часть поверхности металла.

Фактор 4 — толщина легирующей обмазки.

Размерности и количественные значения факторов приведены ниже в соответствующих таблицах. В качестве метода планирования экспериментов был выбран метод дробных реплик Бокса-Уилсона (реализовали полуреплику вида 2^{4-1} , т.е. серия состояла из 8 основных опытов), а получаемая математическая модель считалась линейной и не содержала парных взаимодействий:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4,$$

где Y — параметр оптимизации; X_i — величины факторов в кодированном виде; b_i — коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов «X» на величину «Y».

Для оценки статистических характеристик, достоверности и адекватности модели один из опытов плана (в каждой серии — другой) был 4-кратно повторен, таким образом, каждая серия состояла из 11 опытов (не считая опытов крутого восхождения).

В качестве параметров оптимизации определяли следующие характеристики полученных покрытий: параметр 1 — сумма главных остаточных напряжений рода в плоскости поверхности образца; параметр 2 — степень легированности хромом твердого раствора на основе никеля, т. е. фазы, образующей непрерывный каркас покрытия и обеспечивающей передачу внешних нагрузок и внутренних напряжений на другие, более прочные и упругие фазы; параметр 3 — содержание твердого раствора на основе никеля в объеме приповерхностных зон покрытия; параметр 4 — содержание

вновь образовавшихся химических соединений в объеме покрытия, т.е. фактически степень полноты протекания химических реакций в покрытии в процессе его лазерной обработки; параметр 5 — средняя микротвердость покрытия. Каждый образец снимали на дифрактометре ДРОН-3.0 в медном монохроматизированном излучении в следующей последовательности:

1. Непрерывная съемка при скорости поворота образца 1 град/мин в интервале углов Q от 10 до 72° , для качественного и количественного фазового анализа.

2. Непрерывная съемка образца при скорости его поворота 2 град/мин в том же интервале углов, для расчета периода решетки твердого раствора в напряженном состоянии.

3. Непрерывная съемка ненапряженного эталона, полученного из образца путем снятия стружки с части поверхности покрытия на токарном станке и просеивания стружки через сито с ячейкой 0,2 мм. Таким образом, в этом случае анализировали состояние частиц покрытия, подвергшихся хрупкому разрушению, т.е. после практически полного снятия остаточных напряжений 1 рода.

Применение методики по вариантам 2 и 3 позволило разделить эффекты двух родов, вызывающие суммарное изменение периода решетки твердого раствора: от действия остаточных напряжений (определяется по разнице результатов вариантов 2 и 3) и от легирования твердого раствора (определяется по результатам варианта 3).

Экспериментальные результаты исследований представлены в табл. 2. Результаты расчета математических моделей по выбранным критериям представлены в таблице 3.

Анализ полученных результатов показывает следующее:

Параметр Y_1 — остаточные напряжения 1 рода.

Во всех опытах получены только напряжения отрицательного знака (сжимающие), достигающие величин, близких к пределу прочности на сжатие никелевой матрицы покрытия. Из технологических факторов на напряженное состояние покрытия для покрытий с обмазкой первого и второго составов наиболее сильно влияет фактор X_1 — (скорость перемещения луча лазера): напряжения сжатия тем больше по абсолютной величине, чем выше скорость обработки (и чем меньше диаметр лазерного луча).

Параметр Y_2 — степень легированности твердого раствора на основе никеля (наиболее вероятный легирующий элемент — хром).

Во всех опытах получено высокое содержание хрома в твердом растворе — от 5 до 15 % ат.

Все исследованные технологические факторы существенно влияют на концентрацию хрома в никеле. Для состава В + В₄С она тем больше, чем: меньше скорость лазерного луча; меньше диаметр пятна.

Для состава В + Сг она тем больше, чем: меньше скорость лазерного луча; больше диаметр пятна; больше содержание хрома в обмазке. Таким образом, степень легирования никеля хромом (определяющая его прочность и напряженное состояние), вполне управляема варьированием технологических факторов.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований для реализации
плана дробного факторного эксперимента

№ оп ыт ов	σ_1 , кг/мм ²	С _{тв.р.} , % ат. (легированнос ть тв. раствора)	Q _{тв.р.} , % по объему (количество тв. раствора)	Н _ц , кг/мм ² (микротвердост Б)
Лазерное оплавление с обмазкой В + В ₄ С				
	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄
1	-370	14,6	6,0	365
2	-165	3,6	10,0	390
3	-377	9,7	14,5	383
4	-429, -745, -319, -529	15, 16, 7, 12,	15,2; 15,7; 15,7; 16,8	428, 425, 421, 438
5	-157	10,9	8,6	378
6	-53	8,5	2,2	372
7	-346	11	17,6	390
8	-613	7	20,7	282
Лазерное оплавление с обмазкой В + Сг				
	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂₃	Y ₂₄
1	-201	12	7,5	456
2	-451	3	12,5	487
3	-515	8	18,2	479
4	-523, -511, -501, -513	12, 13, 9, 10	19; 19,6; 19,6; 21,0	535, 531, 526, 547
5	-192	9	8,6	472
6	-116	7	2,2	465
7	-256	9	17,6	487
8	-495	7	20,7	352

Параметр Y_3 — содержание твердого раствора на основе никеля в приповерхностных объемах покрытия. Важность этого фактора состоит в том, что именно твердый раствор, даже если его содержание вблизи поверхности невелико, связывает всю фазу слоя и служит «передатчиком» внешних нагрузок и остаточных напряжений. Объем твердого раствора в покрытии вблизи поверхности не превышал 20 % его содержание было тем больше, чем для образков В + В₄С: меньше скорость лазерного луча; меньше диаметр пятна; выше коэффициент перекрытия; Для образки В + Сг: больше скорость лазерного луча; меньше диаметр пятна; выше коэффициент перекрытия; больше толщина легирующей обмазки.

Одной из основных характеристик фазово-химического состава покрытия является количество упрочняющей фазы в покрытии. Оно может быть определено по остаточному принципу, так как в покрытиях системы Ni-Cr-B-Si окислы практически отсутствуют. В состав упрочняющей фазы входят бориды никеля и борид хрома Cr_2B .

Таблица 3
Результаты расчета коэффициентов уравнений регрессии

Код параметра оптимизации	Число значимых коэффициентов	Доверительный интервал коэффициентов	Коэффициенты регрессии модели типа $Y = B_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + B_3 * X_3 + B_4 * X_4$				
			B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
Y_{11}	5	53.6	-323	-91	76	-49	-56
Y_{12}	3	1.075	8.15	-1.09	-1.66	0.1	0.15
Y_{13}	5	0.813	11.9	-3.33	-1.55	3.41	2.16
Y_{14}	4	5.44	373	-2.75	-18	-15.2	5.5
Y_{21}	4	16.2	-342	-151	28	-22	-2
Y_{22}	4	0.19	8.2	-1.0	1.75	0	0.25
Y_{23}	5	1.69	13.4	4.4	-2.4	2.9	1.7
Y_{24}	5	6	478	212	24	18	9

Как показывает анализ приведенных в табл. 3 данных количество упрочняющей фазы тем больше, чем: Для обмазок В + В₃С: больше скорость лазерного луча; больше диаметр пятна; выше коэффициент перекрытия. Первое из упомянутых влияний значительно сильнее, чем второе. Для обмазки В + Cr: меньше скорость лазерного луча; больше диаметр пятна; ниже коэффициент перекрытия.

Параметр Y_5 — среднее значение микротвердости покрытия. Значение этого фактора зависит практически от всех технологических параметров, однако, следует отметить, что для покрытий системы Ni-Cr-B-Si значение микротвердости не всегда определяет его эксплуатационные свойства. Поэтому оптимизацию режимов лазерной модификации следует проводить с учетом всех характеристик покрытия и, в первую очередь, по показателю износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чачин В.Н., Кардаполова М.А., Спиридонов Н.В. Формирование свойств газотермических покрытий при оплавлении лучом лазера. — М.: Машиностроение, 1996.

— Вып. 11.— С. 69-76. 2. Чачин В.Н., Кардаполова М. А., Спиридонов Н.В., Девойно О.Г., Лазнев В.К. Снижение трещинообразования при оплавлении покрытий из самофлюсующихся сплавов лазерным лучом//Физика и химия обработки материалов. — Москва.— 1991.—№1.— С.125-132.

УДК 621.9.048

В. К. Деревяшкин

ОСНОВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Ультразвуковая обработка относится к числу уникальных технологий, которыми владеет в мире ограниченное количество стран (производящих ультразвуковое оборудование меньше, чем производящих ядерное оружие). Это связано с отсутствием фундаментальных знаний в части ультразвуковой обработки кристаллических и поликристаллических материалов, образования поверхностных и объемных повреждений.

Ультразвук представляет собой периодические упругие колебания с частотой от $2 \cdot 10^4$ до 10^{13} Гц, однако для технологических целей используется диапазон от 16 до 1600 кГц. Распределение таких колебаний происходит только в среде, обладающей упругими свойствами. Для этого используют жидкие среды. Для увеличения производительности могут искусственно увеличивать давление жидкости.

Ультразвук генерируется механическими и электромеханическими излучателями. Чаще всего используются магнитострикционные и пьезоэлектрические электро-механические излучатели.

Магнитострикционные излучатели применяются для генерации ультразвука с частотой до 200 кГц. В основе устройства этих излучателей лежит явление магнитострикции — изменение формы и объема ферромагнетиков, помещенных в переменное магнитное поле. Если ферромагнетик намагничивается в периодически изменяющемся магнитном поле, то в нем возникают вынужденные механические колебания, являющиеся источником ультразвука. Простейшим ультразвуковым магнитострикционным вибратором служит ферромагнитный стержень, являющийся сердечником высокочастотного трансформатора.

Магнитострикционный преобразователь, электромеханический или электроакустический преобразователь, в котором энергия магнитного поля преобразуется в энергию механических колебаний и наоборот, благодаря обратимому эффекту магнитострикции, используется как излучатель или приёмник ультразвука (при измерениях