

помощью плазменной наплавки сплава Инконель 625, и были эквивалентны деформируемому сплаву Инконель 625 (варианты 2, 4 и 3 соответственно). Для определения повторяемости проводимых испытаний деформируемый сплав Инконель 625 был подвергнут коррозионным тестам три раза. Среднее значение массовых потерь при этом составило 167 мг со стандартным отклонением 52 мг и коэффициентом вариации 31 %.

ВЫВОДЫ

1. Использование высокоомощного (15 кВт) волоконного лазера для наплавки промышленных сталей и сплавов позволяет значительно повысить производительность технологического процесса при сохранении качества покрытия, характерного для существующих лазерных технологий наплавки. Применение щелевого сопла для подачи порошка совместно со сканированием лазерного луча способствует повышению эффективности процесса наплавки.

2. При порошковой наплавке сплава Инконель 625 с использованием волоконного лазера была достигнута производительность 270 – 290 г/мин.

3. Полученные покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью (на уровне деформируемого сплава Инконель 625), превосходя покрытия, изготовленные с помощью плазменно-дуговой наплавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pawlowski L. Tick laser coating: A review // Journal of Thermal Spray Technology, 1999. 8(2). P. 279 – 295.
2. Irving B. High-Powered Lasers Gain Ground for Cladding and Hardfacing // Welding Journal. 1991. August. P. 37 – 40.
3. Brennan M. S., Gassmann R. C. Laser Cladding of Nickel and Iron Base Alloys on Boiler Waterwall Panels and Tubes // Corrosion, NACE. 2000. Paper 00235. P. 13 – 19.
4. Whitney E. J., Focus on High Energy Processing // Laser Cladding 101, iMAST Quarterly. 1999. No. 3. P. 3 – 5.
5. Turichin G., Valdaitseva E., Tzibulsky I. et al. Simulation and Technology of Hybrid Welding of Thick Steel Parts with High Power Fiber Laser // Proc. of the VI Int. WLT-conf. on LIM-2011. P. 646 – 655.
6. Rethmeier M., Gook S., Gumenyuk A. Perspectives of application of laser-GMA-hybrid girth welding for pipeline construction // Proc. of the VI Int. Conf. BT/LA-2009. P. 278 – 288.
7. Palmer T. A. Implementation of Laser Cladding for Virginia Class Submarine Main Propulsion Shaft Repair // Commercial Technologies for Maintenance Activities CTMA 2010 Symposium. March 2010. Quantico, VA, USA.
8. Witzel J., Kelbassa I., Gasser A., Backes G. Increasing the Deposition Rate of Inconel 718 for LMD // Proceedings of the 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO 2010. LIA. September 2010. P. 304 – 310.
9. Nowotny St., Brueckner F., Wappler R. et al. Increased Productivity of Laser Surface Cladding by Simultaneously Assisting Energy Sources // Proc. of the 24th Int. Conf. on Surface Modification Technologies SMT. September 2010. Dresden, Germany.
10. Pelletier J. M., Sahour M. C., Pilloz M., Vannes A. B. Influence of Processing Conditions on Geometrical Features of Laser Claddings Obtained by Powder Injection // Journal of Materials Science. 1993. No. 28. P. 5184 – 5188.

УДК 621.793.72:533.9:669.018.25

Повышение износостойкости газотермических покрытий из бронзы БрА7Н6Ф лазерным легированием

О. Г. ДЕВОЙНО¹, д-р. техн. наук, М. А. КАРДАПОЛОВА¹, канд. техн. наук, А. С. ЧАУС², д-р. техн. наук

¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь (scvdmed@bntu.by)

² Материало-технологический факультет Словацкого технического университета, г. Трнава, Словакия (alexander.chaus@stuba.sk)

Разработан и исследован процесс создания на поверхности стальных изделий покрытия с высоким сопротивлением изнашиванию на основе бронзы БрА7Н6Ф, упрочненной износостойкими материалами, введенными методом лазерной химико-термической обработки. С целью оптимизации процесса проведено математическое моделирование.

Ключевые слова: газотермические покрытия, бронза, лазерное легирование, износостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Для упрочнения рабочих поверхностей новых деталей и при ремонте оборудования применяют газотермические покрытия. В качестве материалов из-

носостойких покрытий для деталей узлов трения широкое распространение получили материалы на основе меди, в частности, бронзы. Сложнолегированные бронзы имеют оптимальное сочетание три-

ботехнических свойств при малых и средних удельных нагрузках (от 2 до 5 МПа) [1]. Однако при удельных нагрузках выше допустимых происходит их быстрое разрушение в процессе эксплуатации. Кроме того, медь — основа сплава — дорогой и дефицитный материал. В связи с этим актуальной задачей является создание для различных стальных изделий покрытия на основе бронзы, имеющего стоимость на уровне углеродистой стали и износостойкость в 2–3 раза выше, чем у стандартных бронз.

К настоящему времени накоплен большой теоретический и экспериментальный материал по лазерному поверхностному легированию прежде всего железоуглеродистых [2–8] и алюминиевых [9, 10] сплавов. Имеются данные по лазерному легированию поверхности титана [11] и меди [12]. Однако работы, обобщающие опыт лазерного легирования покрытий из бронз отсутствуют.

Цель работы — разработка состава газотермических покрытий для стальных изделий на основе бронзы БрА7Н6Ф, которые после лазерного легирования обладали бы преимуществами, присущими покрытиям из сложнолегированной бронзы, но со значительно лучшими показателями износостойкости.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При выборе легирующих компонентов для модификации бронзовых покрытий принимали во внимание следующее: 1 — способность данного компонента образовывать с материалом основы высокотвердые соединения, т.е. формирование в структуре покрытия вторичной упрочняющей фазы; 2 — упрочнение твердого раствора данным компонентом; 3 — смачиваемость компонента медью в расплавленном состоянии, т.е. возможность образования первичных твердых упрочняющих фаз.

Учитывали также технологические особенности лазерного легирования, включающие высокоэнергетическое воздействие на вводимые модифицирующие компоненты, сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения сплава в зоне действия лазерного луча. В таких условиях поведение легирующих компонентов не всегда подчиняется обычным закономерностям и требуется экспериментальная проверка эффективности использования того или иного компонента.

Исследование проводили в два этапа. На первом этапе выбирали легирующие компоненты для газотермического покрытия. Проводили установочную серию экспериментов, по результатам которой предварительно оценивали технологичность использования каждого компонента, степень его влияния на структуру и свойства легированной зоны. На втором этапе проводили оптимизацию как состава сложной обмазки из выбранных компонентов, так и режимов

легирования на основе изучения их влияния на структуру и свойства упрочненного слоя.

Для реализации первого этапа разработки состава газотермических бронзовых покрытий, наносимых на подложку из стали 45, для лазерного легирования были выбраны следующие компоненты: 1 — марганец, который образует с медью непрерывный ряд твердых растворов и не имеет с ней соединений, при этом медь замыкает α -область марганца; 2 — никель, также образующей с медью непрерывный ряд твердых растворов без формирования соединений; 3 — хром, создающий с медью эвтектическую систему практически без взаимной растворимости; 4 — кремний, который образует с медью твердые растворы малых концентраций и силицид $\text{Si}_4\text{Cu}_{15}$; 6 — вольфрам, не взаимодействующий с медью в твердом состоянии; 5 — карбид вольфрама (система $\text{WC} - \text{Cu}$ не исследована, однако, образование соединений маловероятно); 7 — карбид титана, с медью не взаимодействует, но сам титан образует с медью четыре титанида (TiCu_4 , Ti_3Cu_4 , TiCu и Ti_2Cu); 8 — карбиды хрома, компоненты в твердом состоянии не взаимодействуют; 9 — диборид титана, смачивается медью.

Указанные компоненты в виде шликера наносили на поверхность газотермического покрытия (толщиной 0,6 мм) из алюминиевой бронзы БрА7Н6Ф, сформированного на подложке из стали 45. Толщина шликерной обмазки на покрытии составляла порядка 0,1 мм [13]. В качестве связующего использовали синтетический клей. Лазерную обработку покрытия проводили на установке непрерывного действия ЛГН-702 с мощностью излучения 850 Вт при скорости перемещения луча 2,67 мм/с, диаметре пятна лазерной обработки 2 мм и коэффициенте перекрытия 0,8. Эти режимы обеспечивали стабильный переплав покрытия на всю глубину и ширину зоны с минимальным влиянием на основу (сталь 45) и, что немаловажно, одинаковый фазовый состав по толщине [13]. Перемещение детали относительно лазерного луча осуществляли с помощью токарного станка.

Испытания на изнашивание проводили методом искусственных баз в условиях граничного трения со смазкой на машине СМТ-1 по схеме "диск-колодка" (образец — диск диаметром 50 мм). В качестве искусственной базы использовали канавку глубиной 0,1 мм, проточенную в покрытии. Глубину канавки измеряли профилографом-профилометром модели 252. Контртелом служила колодка из стали 45 с покрытием из сплава ВСНГН-65. В описанных условиях исследовали износостойкость разработанных покрытий в зависимости от основных параметров работы узлов машин — удельной нагрузки и скорости взаимного перемещения поверхностей рабочего тела и контртела.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор легирующих компонентов для лазерного легирования был осуществлен, в первую очередь, на основании данных рентгеноструктурного анализа, который позволил оценить фазовый состав легированного покрытия, степень легированности твердого раствора, наличие и природу упрочняющей фазы.

Металлографический и рентгеноструктурный анализы показали, что марганец и никель входят в состав твердого раствора, что не давало оснований ожидать их существенного влияния на прочностные свойства бронзы. Кроме того, оба элемента частично окислялись. Хром и вольфрам в чистом виде практически не взаимодействовали с медью, но активно окислялись при лазерной обработке на воздухе. По этой же причине нетехнологичным оказалось использование карбида титана. Наиболее перспективными легирующими компонентами, как показали результаты предварительных экспериментов, являются карбиды вольфрама и хрома, диборид титана и кремний.

Исходное бронзовое покрытие содержало 25 % (об.) алюминидов и 10 % (об.) фосфидов меди, распределенных в легированном твердом растворе. В процессе лазерной обработки фосфиды, по-видимому, выгорают и в оплавленном покрытии не присутствуют.

Кремний довольно активно реагирует с медью, в результате чего после ЛХТО в поверхностном слое появляются силициды меди, наряду с которыми наблюдаются оксиды меди и кремния, а также небольшое количество непрореагировавшего кремния.

Хотя вольфрам с медью не взаимодействует, карбиды вольфрама хорошо смачиваются медью. В воздушной атмосфере при интенсивном энергетическом воздействии монокарбид вольфрама не вполне стабилен и в результате его обезуглероживания происходит образование карбида W_2C . В легированном твердом растворе покрытия со шликерной обмазкой WC наблюдаются следующие фазы, % (масс.): 30 % WC, 5 – 7 % W_2C , 25 % алюминидов меди, по 5 – 7 % Cu_3P и CuO.

При использовании в качестве шликерной обмазки карбидов хрома лазерно-обработанное покрытие включает 20 – 25 % карбидов хрома (преимущественно Cr_7C_3) и 25 – 30 % алюминидов меди, распределенные в твердом растворе хрома в меди.

При использовании диборида титана механизм его воздействия является подобным тому, который наблюдался в случае монокарбида вольфрама. При лазерной обработке диборид титана TiB_2 частично разлагается с образованием моноборида TiB, в результате чего оба соединения находятся в покрытии примерно в одинаковых количествах. При этом титан не входит в твердый раствор.

Проводимое исследование представляло собой многофакторный и многопараметрический эксперимент, т.е. исследуемая система была подвержена влиянию множества входных, поддающихся управлению факторов и характеризовалась множеством выходных параметров, изменения которых необходимо было изучить и оптимизировать.

Традиционная методика планирования эксперимента (метод Гаусса – Зейделя) [14] не гарантирует точного достижения оптимума при всех возможных взаимодействиях компонентов. В связи с этим в качестве метода планирования эксперимента выбрали планирование на симплексе, позволяющее при сравнительно небольшом числе опытов получить нелинейную модель поверхности отклика достаточно высокой степени (в данном случае — полной третьей), учитывающую сложность зависимости свойств системы от состава и возможность химических взаимодействий между компонентами. Алгоритм процедуры планирования и обработки результатов был взят из работы [15], а расчеты проводили на ПЭВМ с использованием программы SYMPLEX3, входящей в пакет прикладных программ STAT, разработанный в Белорусском национальном техническом университете.

Исследуемая система управлялась четырьмя входными факторами — переменными концентрациями компонентов (в объемных долях): X_1 — карбид вольфрама, X_2 — карбиды хрома, X_3 — диборид титана, X_4 — порошкообразный кремний.

В качестве выходных факторов (параметров оптимизации) для построения математических моделей полной третьей степени оценивали следующие величины:

Y_1 — средняя микротвердость покрытия (по данным 50 замеров, МПа);

Y_2 — содержание в покрытии твердого раствора на основе меди, % (об.);

Y_3 — содержание в покрытии упрочняющих фаз высокой твердости (боридов, карбидов и чистого кремния, % (об.);

Y_4 — степень легированности твердого раствора на основе меди; в таблице приведены значения параметра кубической решетки твердого раствора в ангстремах — результаты экстраполяции по шести дифракционным линиям (период решетки чистой меди 3,615 Å);

Y_5 — содержание в покрытии интерметаллидов системы Cu – Al;

Y_6 — износ при трении стального плоского контртела по плоской поверхности покрытия.

Параметр Y_6 имеет относительный характер и описывает скорость изнашивания, так как представляет собой глубину канавки изнашивания при трении с постоянной удельной нагрузкой. Тем не менее,

по его величине можно судить об износостойкости покрытия.

Матрица планирования потребовала реализации 20-ти основных и четырех повторных опытов [14].

Результаты первых 20-ти опытов были использованы для расчета шести математических моделей — уравнений гиперповерхностей отклика параметров Y на вариацию факторов X . Результаты опытов 21 – 24 использовали для определения дисперсии опытов и оценки степени адекватности моделей (все модели оказались адекватными с вероятностью не менее 0,99).

Общий вид модели полного III порядка [14]:

$$Y = \sum_{I=1}^4 B_I X_I + \sum_{I=1}^3 \sum_{J=2}^4 B_{I,J} X_I X_J + \sum_{I=1}^3 \sum_{J=2}^4 G_{I,J} X_I X_J (X_I - X_J) + \sum_{I=1}^3 \sum_{J=2}^4 \sum_{K=3}^4 B_{I,J,K} X_I X_J X_K,$$

где B, G — коэффициенты уравнения; I, J, K — индексы матрицы планирования.

Результаты расчета коэффициентов уравнений регрессии представлены в табл. 1.

Для оценки достоверности моделей программа сравнивает опытные значения параметра с рассчитанными моделями. Это позволяет рассчитать положение максимумов и минимумов в концентрационном тетраэдре методом прямого последовательного перебора с шагом, равным 5 % (об.). Результаты расчета показаны в табл. 2.

Расчет наличия, знака и степени тесноты корреляции между полученными координатами показал следующее:

1. Средняя микротвердость и износостойкость покрытия тесно коррелируют: износ уменьшается с повышением твердости.

2. Твердость покрытий обусловлена величиной объемной доли фаз высокой твердости.

3. Увеличение концентрации твердорастворной составляющей наоборот, снижает твердость и износостойкость покрытий.

4. Степень легированности твердого раствора мало влияет на прочностные свойства покрытий.

Для теории и практики упрочнения весьма важно следующее обстоятельство: максимумы твердости и износостойкости покрытий не совпадают с вершинами концентрационного тетраэдра. Иначе говоря, у-

Таблица 1. Значения коэффициентов в уравнениях регрессии

Коэффициенты	Параметры оптимизации					
	$Y_1 (\pm 105)$	$Y_2 (\pm 5,7)$	$Y_3 (\pm 13)$	$Y_4 (\pm 0,01)$	Y_5	$Y_6 (\pm 1,1)$
B_1	278,0	30,8	28,1	3,6358	19,0	11,0
B_2	266,0	23,1	48,4	3,6230	28,0	11,0
B_3	278,0	51,9	15,9	3,6558	21,0	21,0
B_4	366,0	6,2	34,6	3,6371	50,0	25,0
B_{12}	0,0	0,0	117,9	0,0742	-72,0	20,25
B_{13}	1102,5	-69,975	58,725	-0,1012	11,25	-18,0
B_{23}	825,75	-53,775	170,775	-0,0513	-72,0	131,625
B_{14}	-117,0	80,55	-23,175	0,0166	-87,75	-28,125
B_{24}	497,25	126,45	-69,75	0,0	-135,0	-7,875
B_{34}	0,0	-76,05	221,175	-0,0884	-96,75	67,5
G_{12}	-256,5	-15,975	94,95	-0,1840	54,0	6,75
G_{13}	-3213,0	-83,475	52,875	0,0220	-42,75	49,5
G_{23}	2139,75	243,675	-193,275	-0,0261	-36,0	221,625
G_{14}	441,0	-261,9	-87,975	0,0819	0,0	34,875
G_{24}	-591,75	-272,25	-52,65	0,0108	36,0	55,125
G_{34}	-922,5	-36,0	0,0	-0,2095	38,25	-139,5
B_{123}	5150,25	-38,925	162,0	-0,0297	-51,75	-235,125
B_{124}	-650,25	-849,375	828,675	-0,3879	92,25	-65,25
B_{134}	-3762,0	-104,175	336,825	0,0277	-182,25	-253,125
B_{234}	-4477,5	283,725	-963,0	0,2914	20,25	-263,25

прочнение покрытий происходит не столько из-за высокого уровня свойств отдельных фаз (они ни в одном случае не образуют сплошного слоя), сколько в результате создания многофазных высокодиспер-

Таблица 2. Расчетные координаты точек экстремума для выбранных параметров оптимизации

Параметры оптимизации		Координаты экстремумов (доли единицы)			
		Карбиды вольфрама	Карбиды хрома	Бориды титана	Кремний
Y_1 , кгс/мм ²	max 786	0,25	0,00	0,75	0,00
	min 124	0,75	0,10	0,15	0,00
Y_2 , % (об.)	max 60,7	0,00	0,30	0,00	0,70
	min 3,5	0,45	0,35	0,00	0,20
Y_3 , % (об.)	max 80,9	0,00	0,00	0,45	0,55
	min 15,9	0,00	0,00	1,00	0,00
Y_4 , А	max 3,6579	0,30	0,70	0,00	0,00
	min 3,6140	0,00	0,00	0,70	0,30
Y_5 , % (об.)	max 22,8	0,50	0,00	0,50	0,00
	min 1,8	0,15	0,35	0,20	0,30
Y_6 , мкм	max 52,5	0,05	0,65	0,30	0,00
	min 6,4	0,30	0,05	0,55	0,10

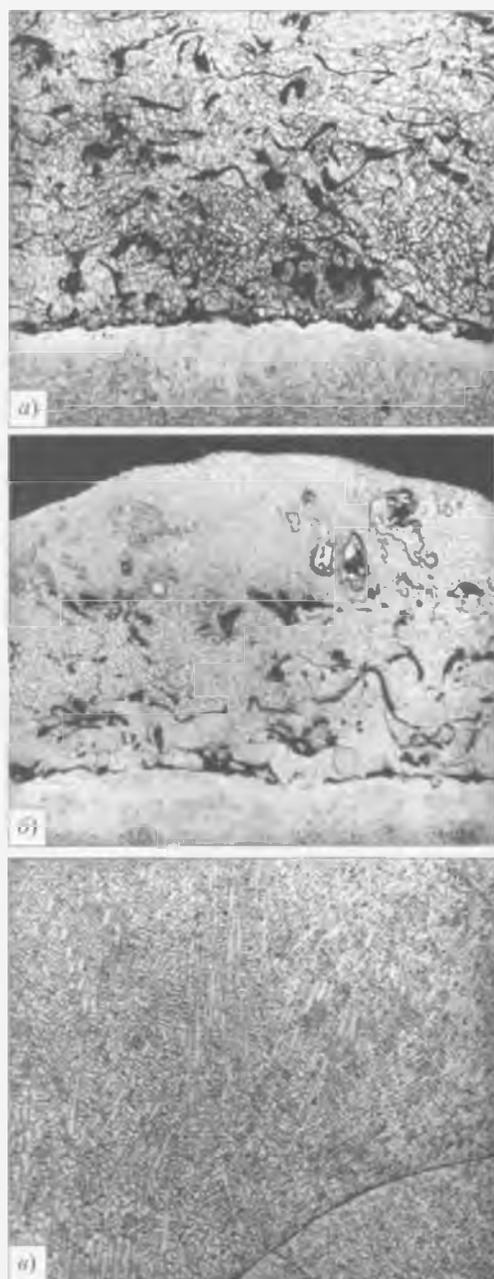


Рис. 1. Микроструктура газотермического покрытия из бронзы БрА7Н6Ф:

a — без оплавления; *б, в* — обработка лучом лазера с неполным расплавлением и сквозным переплавом соответственно

ных структур с весьма развитыми межфазными поверхностями. Таким образом, основным механизмом упрочнения является торможение дислокаций на развитых поверхностях раздела фаз с различной природой.

При этом максимальный уровень свойств обеспечивается при определенном соотношении не только свойств матрицы и упрочняющей фазы, но и их количества. Это подтверждается тем, что, несмотря на наличие корреляции, концентрационные максимумы твердости и износостойкости не совпадают. Так, рас-

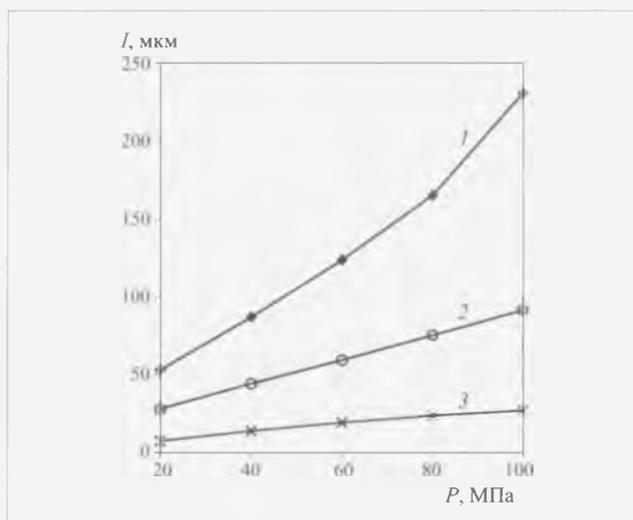


Рис. 2. Зависимость износа I газотермических покрытий из бронзы БрА7Н6Ф от удельной нагрузки P ($v_{тр} = 1$ м/с): 1 — в исходном состоянии без лазерной обработки; 2 — после оплавления лазерным лучом; 3 — после лазерного легирования с применением шликерной обмазки

четы по полученным моделям показывают, что покрытие с максимальной износостойкостью имеет микротвердость ~ 5500 МПа, содержит $\sim 22\%$ легированного твердого раствора, 56% высокотвердых составляющих и 14% алюминидов меди.

Исследовали микроструктуру покрытий напыленной порошковой бронзы, оплавленной при различных режимах с обмазкой (рис. 1). Показано, что после сквозного проплавления (рис. 1, в) она состоит из легированных дендритов твердого раствора, между ветвями которых кристаллизуются мелкодисперсные высокотвердые фазы (карбиды вольфрама и хрома; бориды титана). При неполном энерговыделении введенные фазы из обмазки не успевают до конца раствориться, но покрытие остается работоспособным и может быть рекомендовано для работы в условиях трения с образованием. Неоплавленное покрытие (рис. 1, а) содержит большое количество оксидов.

Для оценки эффективности применения исследуемых покрытий в узлах трения изучали влияние удельной нагрузки P и скорости $v_{тр}$ взаимного перемещения поверхностей рабочего тела и контртела на износостойкость покрытий. Сравнивали три типа покрытий из бронзы БрА7Н6Ф, полученных на образцах стали 45 плазменным напылением: покрытие без лазерной обработки; покрытие, оплавленное лазерным лучом; покрытие, прошедшее лазерную обработку с использованием шликерной обмазки оптимизированного состава. Состав шликера соответствовал минимуму износа согласно данным, представленным в табл. 2. Результаты испытаний приведены на рис. 2 и 3.

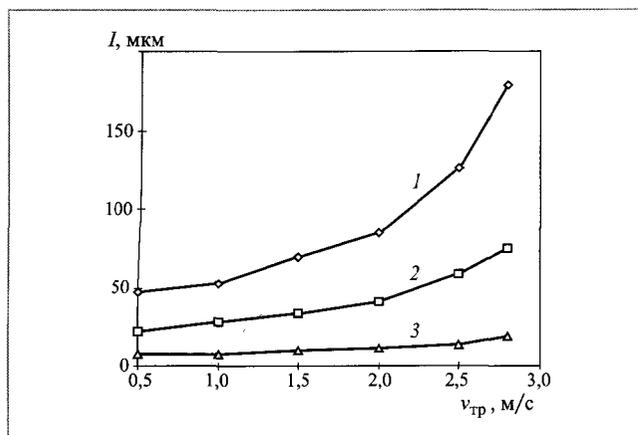


Рис. 3. Зависимость износа I газотермических покрытий из бронзы БрА7Н6Ф от скорости трения $v_{тр}$ ($P = 20$ МПа): 1 — в исходном состоянии без лазерной обработки; 2 — после оплавления лазерным лучом; 3 — после лазерного легирования с применением шликерной обмазки

Проведенные исследования показали, что наибольший прирост износостойкости покрытия обеспечивает лазерное оплавление и легирование, для которого характерны наивысшие скорости фазовых превращений как при оплавлении, так и при кристаллизации материала покрытия. Это приводит к возникновению в твердом растворе — основной фазы любого конструкционного материала — высоких концентраций линейных и точечных дефектов, что подтверждено рентгеновскими исследованиями [13]. Корреляционно-регрессионная обработка данных показала линейный характер зависимости износа от параметров испытаний, причем влияние удельной нагрузки оказалось более существенным, чем скорости трения.

ВЫВОДЫ

1. Исследована и подтверждена возможность использования лазерной обработки для повышения твердости и износостойкости газотермических покрытий на основе бронзы БрА7Н6Ф для деталей, работающих в условиях повышенного изнашивания.

2. Рассчитаны математические модели структурообразования при лазерной химико-термической обработке покрытий и на их основании определены оптимальные сочетания упрочняющих компонентов: карбидов вольфрама и хрома, диборида титана и порошкообразного кремния.

3. Микроструктура оплавленной лазером бронзы состоит, в основном, из высоколегированных дендритов твердого раствора на основе меди и фаз (карбидов вольфрама и хрома, боридов титана) высокой

твердости. Размер упрочняющих фаз составляет 100 – 500 мкм.

4. Лазерное оплавление и легирование с использованием шликерной обмазки установленного оптимального сочетания упрочняющих компонентов обеспечивает существенное повышение износостойкости газотермического покрытия на основе бронзы БрА7Н6Ф.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 368 с.
2. Yan H., Wang A., Xiong Z., Xu K., Huang Z. Microstructure and wear resistance of composite layers on a ductile iron with multcarbide by laser surface alloying // Applied Surface Science. 2010. V. 256. P. 7001 – 7009.
3. Man H. C., Leong K. H., Ho K. L. Process monitoring of powder pre-paste laser surface alloying // Optics and Lasers in Engineering. 2008. V. 46. P. 739 – 745.
4. Zhong M., Liu W., Zhang H. Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner // Wear. 2006. V. 260. P. 1349 – 1355.
5. Lo K. H., Cheng E. T., Kwock C. T., Man H. C. Improvement of cavitation erosion resistance of AISI316 stainless steel by laser surface alloying using fine WC powder // Surface and Coatings Technology. 2003. V. 165. P. 258 – 267.
6. Gemelli E., Gallerie A., Caillet M. Improvement of resistance to oxidation by laser alloying on a tool steel // Scripta Materialia. 1998. V. 39, No. 10. P. 1345 – 1352.
7. Cojocar M., Taca M. Tungsten carbide laser alloying of a low alloyed steel // Applied Surface Science. 1996. V. 106. P. 258 – 262.
8. Tassin C., Laroudie F., Pons M., Lelait L. Improvement of the wear resistance of 316L stainless steel by laser surface alloying // Surface and Coatings Technology. 1996. V. 80. P. 207 – 210.
9. Gordani G. R., Shojarazavi R., Hashemi S. H., Isfahani A. R. N. Laser surface alloying of an electroless Ni-P coating with Al-356 substrate // Optic Lasers in Engineering. 2008. V. 46. P. 550 – 557.
10. Fu Y., Betchelor A. W., Gu Y., Khor K. A., Xing H. Laser alloying of aluminium alloy AA6061 with Ni and Cr. Part 1. Optimization of processing parameters by x-ray imaging // Surface and Coatings Technology. 1998. V. 99. P. 287 – 294.
11. Tian Y. S., Chen C. Z., Wang D. Y., Huo Q. H., Lei T. Q. Laser surface alloying of pure titanium with TiN – B – Si – Ni mixed powders // Applied Surface Science. 2005. V. 250. P. 223 – 227.
12. Majumdar J., Manna I. Laser surface alloying of copper with chromium, I. Microstructural evolution // Materials Science and Engineering. 1999. V. A268. P. 216 – 226.
13. Девойно О. Г., Кардаполова М. А. Получение износостойких композиционных порошковых покрытий оплавлением модифицирующих обмазок лазерным лучом // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. Донецк: ДонГТУ, 2001. Вып. 16. С. 56 – 65.
14. Ногин В. Д., Протодяконов И. О., Евлампиев И. И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986. 384 с.
15. Новик Ф. С. Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем. М.: Металлургия, 1985. 256 с.