

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ

А.Н. ГРИГОРЧИК

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Исследована структура, фазовый состав, дюрометрические свойства и адгезионная прочность напыленного покрытия из алюминиевого сплава АД-1 в исходном состоянии и после отжига при 700 °С и времени выдержки 10, 20 и 30 мин. Установлено, что в результате отжига напыленных алюминиевых покрытий в них на границе со стальной подложкой образуются диффузионные слои глубиной $\approx 80\text{--}160$ мкм, содержащие интерметаллидные фазы $Al_{13}Fe_4$, Al_6Fe , Al_5Fe_2 . Показано, что микротвердость образовавшихся диффузионных слоев достигает ≈ 700 HV 0,025. Прочность сцепления алюминиевых покрытий со стальной основой после отжига при 700 °С в течение 20 мин возрастает примерно в 2 раза по сравнению с исходным состоянием.

Ключевые слова: газотермическое напыление, алюминиевый сплав, отжиг, диффузионный слой, адгезия.

INFLUENCE OF ANNEALING ON STRUCTURE AND PROPERTIES GAS-THERMAL ALUMINUM COATINGS

A.N. GRIGORCHIK

Joins Institute of Mechanical Engineering of National Academy
of Sciences of Belarus

The structure, phase composition, durometric properties and adhesion strength of the sprayed coating made of the Al99,3 aluminum alloy in the initial state and after annealing at 700 °C and holding time of 10, 20 and 30 minutes have been investigated. It has been established that as a result of annealing of the deposited aluminum coatings, diffusion layers with a depth of $\approx 80\text{--}160$ μm are formed in them at the interface with a steel substrate, containing intermetallic phases $Al_{13}Fe_4$, Al_6Fe , Al_5Fe_2 . It is shown that the microhardness of the formed diffusion layers reaches ≈ 700 HV0.025. The adhesion strength of aluminum coatings to a steel base after annealing at 700 °C for 20 minutes increases by a factor of 2 in comparison with the initial state.

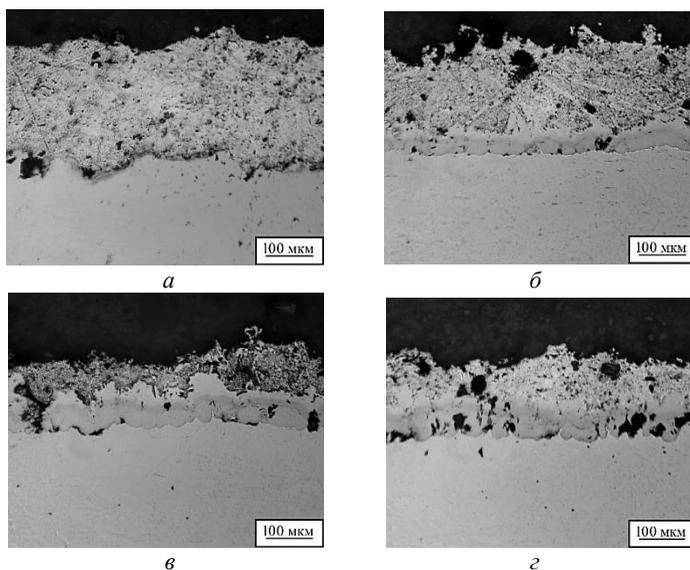
Keywords: thermal spraying, aluminum alloy, annealing, diffusion layer, adhesion.

Введение. Газотермическое напыление является эффективным и производительным способом формирования защитных покрытий на поверхностях изделий [1–3]. В частности, напыление покрытий методом высокоскоростной металлизации является перспективным способом формирования защитных слоев из алюминиевых сплавов на поверхностях изделий, работающих в агрессивных средах. Вместе с тем, напыленные газотермические покрытия из алюминиевых сплавов имеют низкую адгезионную прочность сцепления со стальной основой, а также невысокие физико-механические характеристики. В связи с этим целесообразно проводить дополнительную термическую обработку газотермических покрытий из алюминиевых сплавов, позволяющую повысить их прочностные свойства за счет протекания диффузионных процессов между основой и покрытием. Известны способы термической обработки газотермических покрытий из алюминиевых сплавов при высоких температурах 900–950 °С и времени выдержки 2–4 ч [4]. Однако, длительная выдержка при высоких температурах существенно снижает свойства стальной основы, на которую нанесено газотермическое покрытие. В связи с этим представляет интерес провести исследование структуры, дюрометрических и прочностных свойств газотермических покрытий из алюминиевого сплава после термической обработки при температуре 700 °С и кратковременной выдержке.

Получение образцов и методики исследований. Напыление газотермического покрытия из алюминиевого сплава АД-1 выполнялось методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [1]. Покрытия напылялись на пластину (80×80×5 мм), изготовленную из стали 20. Толщина напыленного покрытия составляла ≈ 250 мкм. Исследовалось структурно-фазовое состояние покрытий из псевдосплава в исходном состоянии (после напыления) и после термической обработки, заключающейся в нагреве образцов покрытий до температуры 700 °С и выдержке в течение 10, 20 и 30 мин с последующим охлаждением на воздухе. Металлографические исследования газотермических покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Измерения микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 25$ г. Прочность сцепления напыленного покрытия с

основой определялась штифтовым методом на универсальной гидравлической машине INSTRON Satec 300LX.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате газотермического напыления алюминиевого сплава АД-1 формируется плотное покрытие (рисунок 1, *a*) с пористостью, не превышающей ≈ 5 об. %. Фазовый состав напыленного покрытия включает в себя Al и Al_2O_3 , а его микротвердость составляет ≈ 65 HV 0,025 (рисунок 2).



a – исходное состояние; *b* – после отжига при 700 °С в течение 10 мин;
v – то же в течение 20 мин; *z* – то же в течение 30 мин

Рисунок 1 – Характерные микроструктуры газотермического покрытия из алюминиевого сплава АД-1

В результате отжига газотермических покрытий при 700 °С в течение 10, 20 и 30 мин происходит локальное расплавление алюминиевого покрытия и его диффузионное насыщение атомами железа из подложки, а стальной подложки атомами алюминия. В результате протекания диффузионных процессов между подложкой и алюминиевым покрытием в граничных слоях подложки и покрытия образуются интерметаллидные соединения системы Fe-Al (рисунок 1 *b*, *v*, *z*),

обладающие повышенной микротвердостью (рисунок 2). Очевидно, что в результате отжига покрытия из алюминиевого сплава АД-1 в течение 10 мин при 700 °С образуется диффузионный слой толщиной ≈ 80 мкм (рисунки 1, 2). Увеличение времени термической обработки покрытий до 20 и 30 мин приводит к возрастанию толщины диффузионных слоев до ≈ 100 мкм и ≈ 160 мкм (рисунки 1 и 2). Фазовый состав образовавшегося диффузионного слоя в алюминиевом покрытии включает в себя фазы $Al_{13}Fe_4$, Al, Al_6Fe , Al_3Fe_2 (рисунок 3).

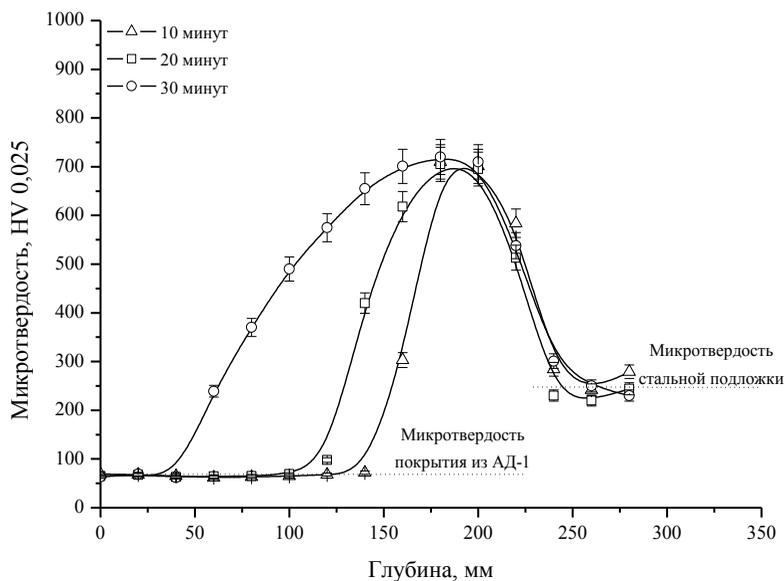


Рисунок 2 – Распределение микротвердости по глубине газотермических покрытий из алюминиевого сплава АД-1 после отжига при 700 °С и различном времени выдержки

Из данных, представленных на рисунке 2, можно видеть, что максимальные значения микротвердости покрытий из сплава АД-1 после отжига при 700 °С в течение 10–30 мин достигаются на расстоянии ≈ 50 –100 мкм от стальной подложки и составляют ≈ 700 НВ 0,025. Указанное повышение микротвердости обусловлено образованием большого количества интерметаллидных соединений системы Fe-Al, содержащих пониженное количество железа, и,

подложки с напыленным алюминиевым покрытием достигается за счет образования при отжиге на их границе прочного диффузионного слоя (рисунок 1, б, в, г).

Таблица 1 – Адгезия алюминиевых покрытий со стальной подложкой

Материал покрытия, обработка	Адгезия, МПа	Среднее значение адгезии, МПа
Покрытие из алюминиевого сплава АД-1, напыленное на стальную подложку из стали 20	35,1	32,2
	35,2	
	30,6	
	27,7	
Покрытие из алюминиевого сплава АД-1, напыленное на стальную подложку из стали 20 + отжиг 700 °С, 20 мин	65,0	59,8
	51,0	
	65,2	
	51,0	
	66,9	

Таким образом, непродолжительный высокотемпературный отжиг газотермических покрытий из алюминиевых сплавов является эффективной обработкой, приводящей к образованию в покрытиях интерметаллидных соединений системы Fe-Al, обеспечивающих повышение их микротвердости и прочности сцепления со стальной основой.

Заключение. Исследовано структурно-фазовое состояние, дюрометрические свойства и прочность сцепления напыленного газотермического покрытия из сплава АД-1 в исходном состоянии и после отжига при 700 °С в течение 10, 20 и 30 мин. Показано, что в исходном состоянии покрытие включает в себя фазы Al и Al₂O₃, а его микротвердость составляет 65 HV 0,025. Установлено, отжиг алюминиевого покрытия приводит к формированию твердого диффузионного слоя на границе «стальная подложка-покрытие», имеющего высокую микротвердость. В частности, глубина диффузионного слоя в покрытиях после отжига при 700 °С в течение 10, 20 и 30 мин составляет ≈ 80–160 мкм, а их микротвердость достигает значений ≈ 700 HV 0,025. Повышение дюрометрических свойств отожженных покрытий обусловлено выделением в них в процессе

термической обработки интерметаллидных соединений $Al_{13}Fe_4$, Al_6Fe , Al_5Fe_2 . Также показано, что отжиг покрытий при 700 °С и 20 мин приводит к увеличению прочности сцепления напыленных покрытий из алюминиевого сплава АД-1 со стальной основой примерно в 2 раза по сравнению с исходным состоянием.

Список литературы

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск.: УП «Технопринт», 2004. – 200 с.

2. Григорчик, А.Н. Износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов, подвергнутых ионно-плазменному азотированию / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский // Вестник Бел. гос. ун-та транспорта. – 2016. – № 1. – С. 308–311.

3. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии. – Минск, 1997. – Т. 4. – С. 670–673.

4. Вашко, А.А. Алитирование сталей / А.А. Вашко, К.О. Матишева // Молодежь и наука: Сб. материалов VI Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section1.html>.

5. Исследование структуры и свойств плазменных покрытий на основе Fe-Al // И.А.Селиверстов [и др.] / Научный вестник Херсонской государственной морской академии. – № 1 (10). – 2014. – С. 249–254.

References

1. Belocerkovskij, M.A. *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamnogo napyleniya antifrikcionnyh pokrytij* [Technologies of activated flame spraying of antifriction coatings] / M.A. Belocerkovskij. – Minsk: Tekhnoprint Publ., 2004. – 200 p.

2. Grigorchik, A.N. *Iznosostojkost' giperzvukovyh gazotermicheskikh pokrytij iz stalej razlichnyh klassov, podvergnutyh ionno-plazmennomu*

azotirovaniyu [Wear resistance of hypersonic gas thermal coatings made of steels of various classes subjected to ion-plasma nitriding] / A.N. Grigorichik, V.A. Kukareko, M.A. Belocerkovskij // *Vestnik Bel. gos. un-ta transporta = Bulletin of the Belarusian State University of Transport.* – 2016. – No. 1. – P. 308–311.

3. Belocerkovskij, M.A. *Metody i oborudovanie dlya formirovaniya vysokoenergeticheskikh dvuhfaznyh potokov* [Methods and equipment for the formation of high-energy two-phase flows] // *Fizika plazmy i plazmennye tekhnologii = Plasma physics and plasma technologies.* – Minsk. – Vol. 4. – P. 670–673.

4. Vashko, A.A. *Alitirovanie stalej* [Aluminizing steels] / A.A. Vashko, K.O. Matisheva. <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section1.html>.

5. Issledovanie *struktury i svojstv plazmennyh pokrytij na osnove Fe-Al* [Study of the structure and properties of plasma coatings based on Fe-Al] // I.A. Seliverstov [et al.] // *Nauchnyj vestnik Hersonskoj gosudarstvennoj morskoy akademii = Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy.* – No. 1 (10). – 2014. – P. 249–254.

Поступила 12.08.2020

Received 12.08.2020