

## 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  $\approx 700$  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  $\approx 80\text{--}160$   $\mu\text{m}$  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  $\approx 700$  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.*

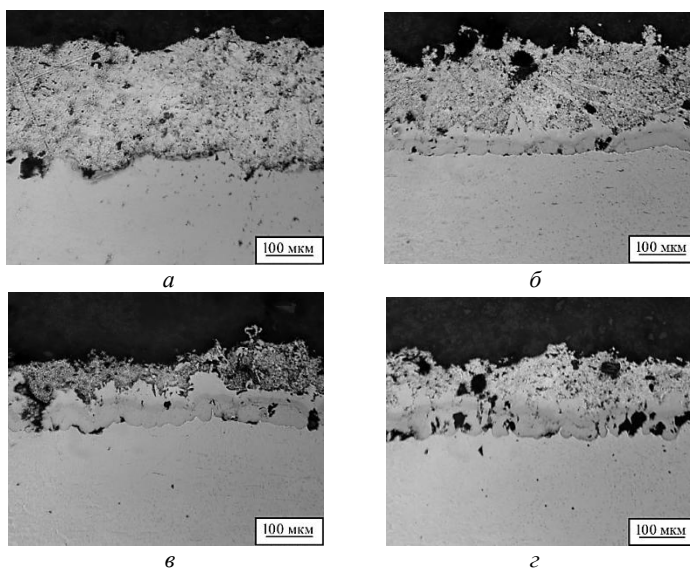
**Keywords:** thermal spraying, aluminum alloy, annealing, diffusion layer, adhesion.

**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  $\approx 5$  об. %. Фазовый состав напыленного покрытия включает в себя Al и  $Al_2O_3$ , а его микротвердость составляет  $\approx 65$  HV 0,025 (рисунок 2).



*a* – исходное состояние; *б* – после отжига при 700 °С в течение 10 мин;  
*в* – то же в течение 20 мин; *з* – 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 *б*, *в*, *з*),

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  $\approx 80$  мкм (рисунки 1, 2). Увеличение времени термической обработки покрытий до 20 и 30 мин приводит к возрастанию толщины диффузионных слоев до  $\approx 100$  мкм и  $\approx 160$  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).

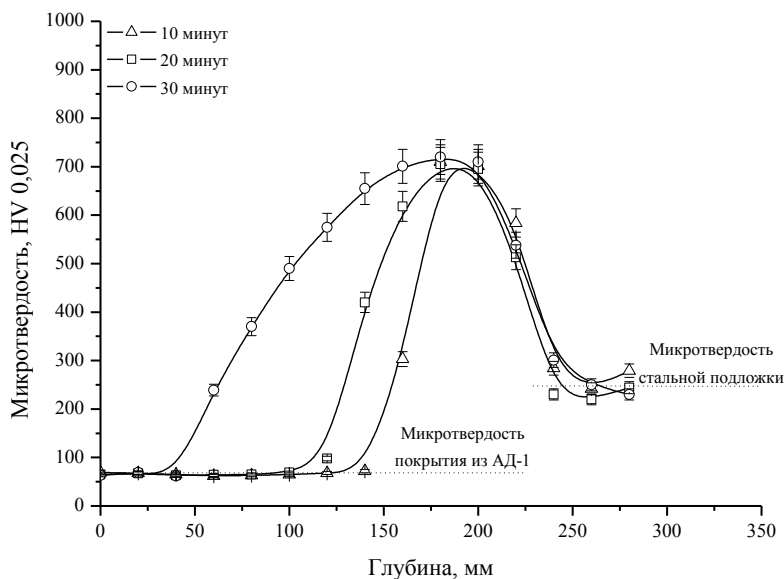


Рисунок 2 – Распределение микротвердости по глубине газотермических покрытий из алюминиевого сплава АД-1 после отжига при 700 °С и различном времени выдержки

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  $\approx 50$ –100 мкм от стальной подложки и составляют  $\approx 700$  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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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