

В результате выполнения работы был исследован доэвтектический силумин марки АК10М2Н, подвергнутый комплексной обработке методами электровзрывного легирования и интенсивным электронным пучком. Установлено, что комплексная обработка приводит к формированию на поверхности силумина модифицированного слоя с многофазной структурой. Толщина слоя варьируется в зависимости от параметров комплексного воздействия, и достигает максимальных значений 294 мкм при массе порошка  $Y_2O_3 = 0,0589$  г, энергии разряда 2,8 кВ и плотности энергии пучка электронов 35 Дж/см<sup>2</sup>. Результаты измерений микротвердости показывают, что под воздействием комплексной обработки микротвердость поверхностных слоев силумина увеличивается в 5 – 8 раз, и достигает своего максимума в 553,57 HV при режиме: масса порошка  $Y_2O_3 = 0,0883$  г, энергии разряда 2,6 кВ, плотности энергии пучка электронов 35 Дж/см<sup>2</sup>. Методами рентгенофазового анализа установлено, что увеличение порошковой навески  $Y_2O_3$  при одновременном снижении напряжения разряда приводит к кратному увеличению иттрия, кремния, а также фаз, сформированных этими элементами, в поверхностном слое материала. С этим, по мнению авторов, связано кратное повышение микротвердости силумина АК10М2Н.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № 3.1283.2017/4.6.*

#### **Список литературы**

1. Cheng J. [et al.] Influence of High Pulsed Magnetic Field on the Dislocations and Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al Composites // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – V. 27. – P. 1083-1092.
2. Utu I.D., Marginean G. Effect of electron beam remelting on the characteristics of HVOF sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings deposited on titanium substrate // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2017. – V. 526. – P. 70–75.
3. Lan J., Shen X., Liu J., Hua L. Strengthening mechanisms of 2A14 aluminum alloy with cold deformation prior to artificial aging // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 745. – P. 517-535.
4. Dong X., Yang H., Zhu X., Ji S. High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 773. – P. 86-96.

### **ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА СВС НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ ХОЛОДНОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ**

*ЯН СЯО, Б.С. ЗЕНИН*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
E-mail: rouyang330@outlook.com

Одной из важных характеристик напыляемых покрытий является адгезия. При газотермическом напылении уровень адгезии определяется как высокой температурой напыляемых частиц, так и их скоростью. В методе холодного газодинамического напыления (ХГН) величина адгезии зависит главным образом не от тепловой, а от кинетической энергии напыляемых частиц, ускоряемых «холодным» газом, что позволяет устранить нежелательный нагрев частиц при их движении в высокотемпературной струе [1]. В основе данной технологии лежит процесс формирования металлических покрытий при соударении холодных (с температурой, существенно меньшей температуры плавления) металлических частиц, ускоренных сверхзвуковым газовым потоком до скорости несколько сот метров в секунду, с поверхностью обрабатываемой детали [2].

В момент взаимодействия напыляемой частицы с обрабатываемой поверхностью (подложкой) образование адгезионной связи покрытие – основа контролируется величиной контактной температуры на границе частица-подложка. При ХГН контактную температуру можно значительно повысить, если для получения покрытия использовать экзотермически реагирующие порошки [3], в которых выделяется значительное количество тепла за счет реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [4].

В работе проводится анализ влияния величины эффекта адиабатического нагрева на температуру в контакте частицы с подложкой при ХГН на примере пяти порошковых материалов систем Fe-Al и Ni-Al (чистые металлы Fe, Al, Ni и экзотермически реагирующие порошки Fe<sub>50</sub>Al<sub>50</sub>, Ni<sub>50</sub>Al<sub>50</sub>). Частицы из данных материалов напыляются на подложку из Ст20. Начальная температура подложки T<sub>s</sub> = 300К, скорость частиц варьировалась в широких пределах от 100 до 1000 м/с. Повышение температуры для экзотермически реагирующих порошков (тепловой эффект процесса СВС) ΔT<sub>экз</sub> (Fe<sub>50</sub>Al<sub>50</sub>) = 735К и ΔT<sub>экз</sub>(Ni<sub>50</sub>Al<sub>50</sub>) = 1765К [3]. Для расчета температуры в контакте используем метод, предложенный в [5, 6]

$$T_c(\xi, \tau) = T_c^0(\xi, \tau) + T_v(\xi, \tau) \quad (1)$$

где T<sub>c</sub><sup>0</sup> -температура в контакте двух различно нагретых тел без учета скорости; ΔT<sub>v</sub>-температура дополнительного подогрева контакта за счет тепла, выделяемого при ударе. В нашем случае используем эту формулу в виде

$$T_c(\xi, \tau) = T_c^0(\xi, \tau) + T_v(\xi, \tau) + \Delta T_{\text{экз}} \quad (2)$$

Так как для начала экзотермической реакции (СВС) необходим предварительный подогрев исходного материала до температур от 600°C и выше [4], то по формуле (2) расчет для экзотермических порошков проводим для условий, когда их температура за счет кинетической энергии достигнет температуры «зажигания» и начнет выделяться тепловая энергия экзотермической реакции.

Таблица 1 -Теплофизические свойства материалов

Материал	ρ, кг/м <sup>3</sup>	c, Дж/кг*К	λ, Вт/м*К	T <sub>m</sub> , К
Ni	8900	443.6	90.4	1728
Fe	7870	447	80	1811
Al	2697	903.7	236	933
Fe <sub>50</sub> Al <sub>50</sub>	5283	675	158	1372
Ni <sub>50</sub> Al <sub>50</sub>	5798	673	163.2	1330
Ст 20	7850	690	50.7	1538

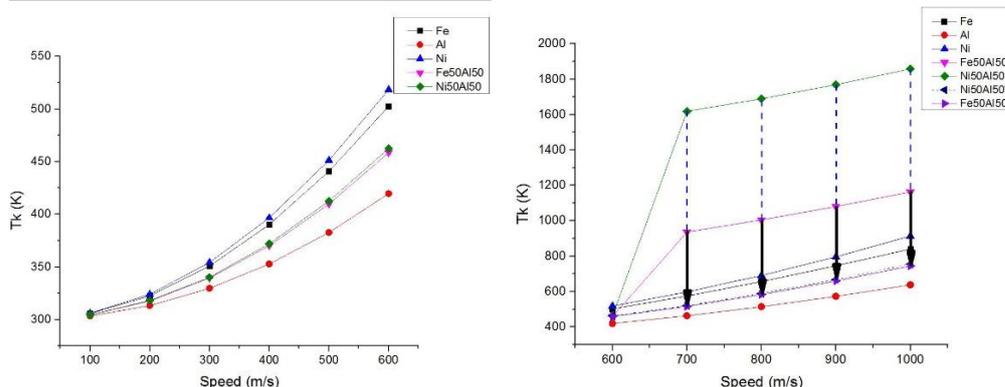


Рисунок 1- Температура в контакте при скоростях напыляемых частиц из чистых металлов и сплавов 100-600 м/с (а) и 600-1000м/с (б).

На рисунке 1(а) представлены результаты расчета температуры в контакте при скоростях 100-600 м/с для исследованных материалов. Для материалов с увеличением

скорости частиц температура в контакте возрастает за счет кинетической энергии, достигая при скорости 600 м/с значений 419К, 502К, 518К, 458К и 462К для Al, Fe, Ni, Fe<sub>50</sub>Al<sub>50</sub> и Ni<sub>50</sub>Al<sub>50</sub> соответственно. В сплавах эффект экзотермической реакции проявляется при скоростях от 700 м/с и выше, дополнительно повышая температуру в контакте на  $\Delta T_c = 420\text{K}$  для Fe<sub>50</sub>Al<sub>50</sub> и  $\Delta T_c = 1098\text{K}$  для Ni<sub>50</sub>Al<sub>50</sub> практически независимо от скорости (по сравнению с гипотетическим случаем - отсутствием СВС реакции) (рисунок 1(б)).

**Выводы.** Полученные результаты показывают важную роль дополнительного подогрева напыляемых частиц порошка в момент их контактного взаимодействия с подложкой в формировании контактной температуры и высокую эффективность применения экзотермически реагирующих порошков при получении покрытий с повышенной адгезией.

#### Список литературы

1. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия: -1986. – 204 с.
2. Алхимов А.П. Научные основы холодного газодинамического напыления (ХГН) и свойства напыленных материалов: монография / А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.В. Плохов. -Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 280 с.
3. Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С., Никитин М.В. Газотермическое напыление композиционных порошков: - Л.:Машиностроение, 1985. – 199 с.
4. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика. – Черногловка: ИСМАН, 2002. – 234.
5. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В. Ф. Температура вблизи контактной границы при высокоскоростном соударении микрочастицы с поверхностью. //Физическая мезомеханика 3 1 (2000) 53-57с.
6. Ян Сяо, Чжао Ифань, Зенин Б.С. Особенности температурных условий формирования многослойных покрытий при газодинамическом напылении // Высокие технологии в современной науке и технике / V Международная научно техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 5–7 декабря 2016 г.: сборник трудов. – Томск: – 562 с. 212-213.

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ НА КАЧЕСТВО ОПЛАВЛЯЕМОГО СЛОЯ ПОРОШКА НА ПРИМЕРЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1-0

*М.П. РАГУЛИНА, С. ЮАНЬ, М.Г. КРИНИЦЫН, Б.С. ЗЕНИН*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [alisa.barton112@gmail.com](mailto:alisa.barton112@gmail.com)

Получение изделий методом селективного лазерного сплавления происходит за счёт формирования отдельных слоёв из объёма порошка и последующее их сплавления друг с другом [1-3]. Основными характеристиками, которые оказывают большое влияние на качество получаемых поверхностей и объёма материала, являются мощность и скорость лазерного луча. Подбор параметров процесса – это важная часть технологии селективного лазерного сплавления.

В работе были рассмотрены различные условия формирования слоёв из порошка титанового сплава ВТ1-0 фракцией 50-56 мкм на титановой подложке, с целью получения условий наибольшей плотности материала в формируемом слое в объёме образца. Были получены 9 однослойных образцов, параметры процесса представлены в таблице 1, где Р – это мощность лазерного луча, [Вт];  $v$  – скорость луча, [мм/с].