УДК 621.311.1.018.3

О. Л. Гайдамак, к. т. н., доц.; В. И. Савуляк, д. т. н., проф.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ, И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКЕ

В статье исследованы свойства покрытий на основе алюминия, полученных газодинамическим напылением. Показано, что полученные покрытия могут быть применены для создания пористых теплоотводящих приспособлений для охлаждения элементов микропроцессорной техники, что может значительно уменьшить их габариты и упростить их системы охлаждения.

***Ключевые слова**: микропроцессорная и другая компьютерная техника, системы охлаждения, газодинамическое напыление.*

Введение

Создание функциональных покрытий на поверхностях деталей позволяет существенно влиять на эксплуатационные характеристики и предоставлять этим поверхностям новые, не присущие материалу детали, качества. Например, создание покрытий на основе алюминия на стальных деталях может защитить эти детали от коррозии и значительно изменить фрикционные, электропроводящие и теплопроводные свойства покрытых поверхностей.

На кафедре технологии повышения износостойкости Винницкого национального технического университета разработана и изготовлена опытная установка для газодинамического нанесения функциональных покрытий. Порошковые частицы, разогнанные до высоких скоростей, близких к скорости звука или выше неё, при столкновении с подкладкой адгезионно взаимодействуют с ней на атомном уровне и способны создавать прочное соединение с последней и между частицами порошка [1, 2]. При этом температура напыленной частицы ниже температуры ее плавления.

Установка газодинамического напыления

На рис. 1 показано фото установки газодинамического нанесения функциональных покрытий. Основными элементами установки являются нагреватель воздуха 1 и напылитель порошка 2.

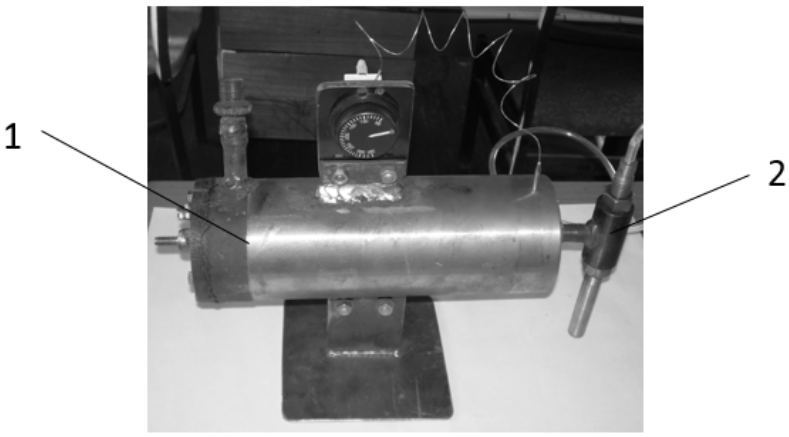


Рис. 1. Установка для газодинамического нанесения функциональных покрытий: 1 – нагреватель воздуха, 2 – напылитель порошка

Нагреватель воздуха 1 изготовлен из навитой спиралью нихромовой проволоки, через которую продувают сжатый воздух, который далее попадает в напылитель 2, где поток ускоряется до скорости звука. В этот воздушный поток за счет эжекции подается напылительный материал – порошок алюминия. Разгоняясь в нагретом воздушном потоке,

порошок достигает поверхности подложки и образует сплошное покрытие, используя для этого полученные кинетическую энергию и тепло.

Напылитель (рис. 2) [3] состоит из корпуса 1, в котором размещена игла 2 для регулирования параметров воздушного потока. К корпусу 1 присоединен штуцер с каналом 3 для подачи порошка, который всасывается в сопло 4 за счет эффекта эжекции. Сжатый воздух подают в напылитель через канал 5.

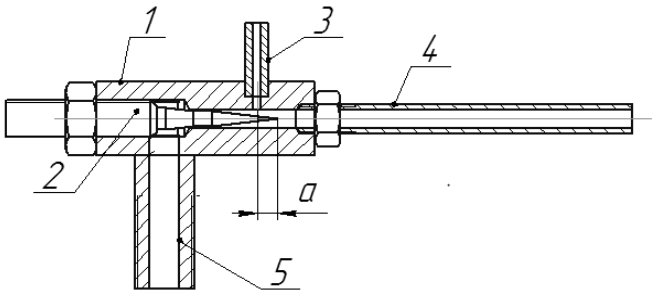


Рис. 2. Напылитель: 1 – корпус, 2 – игла, 3 – канал подачи порошка, 4 – сопло, 5 – канал подачи сжатого воздуха

Цель и методика исследования

Целью исследования являются: определение коэффициента использования алюминиевого порошка в зависимости от режимов напыления; определение прочности сцепления пятна покрытия с подложкой; определение пористости полученных покрытий и оценки перспектив их применения в различных отраслях и, в частности, в микропроцессорной технике.

Для проведения исследований использовали алюминиевый порошок с размером частиц 60 – 100 мкм. Порция порошка составляла 0,47 г. Дистанция напыления 15 мм. Для подложки использовали пластины из стали Ст. 3 толщиной 1 мм. Поверхность пластин перед напылением не обрабатывали.

Положения иглы 2 определяют размером *a*, принимавшим три разных значения. Фиксировали температуру начала и конца напыления. Давление воздуха составляло 0,57 МПа. Взвешивали подложку до и после напыления. Все данные заносили в таблицу 1, где *a* – расстояние, определяющее положение иглы 2 относительно канала ввода порошка 3, T_1, и T_2 – температура начала и конца напыления, M_1 и M_2 – масса основания до и после напыления, M_n – масса пятна напыления, *K* – коэффициент использования порошка, который определяют как отношение массы фигуры напыления к начальной массе порции порошка и умноженной на 100%. Результаты напыления показаны на рис. 3.

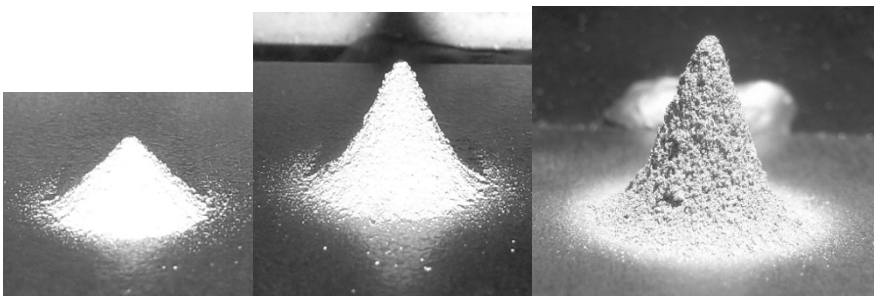
Используя функцию «массоцентровочные характеристики» программы Компас, определили массу фигуры напыления как сплошного материала для алюминия А0 ГОСТ 11069-2001, который имеет плотность ρ_1 = 0,002700 г / мм^3.

Плотность покрытия ρ_2 определяли как отношение массы взвешенной фигуры напыления к ее рассчитанному объему.

Пористость *J* фигуры напыления определяли по формуле (1)

$$J = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} 100\% \qquad (1)$$

То есть определяли содержание воздуха в объеме фигуры напыления.



а *б* *в*

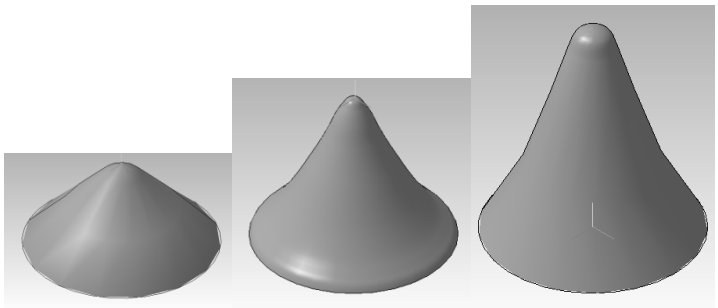
Рис. 3. Фигуры напыления а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3

Таблица 1

Влияние режимов напыления на коэффициент использования порошка алюминия

№ образца	*a*, мм	T_1, ºС	T_2, ºС	M_1, г	M_2, г	M_n, г	*K*, %
1	2,25	320	330	10,41	10,45	0,04	8
2	1,85	320	360	10,55	10,67	0,12	25,5
3	1,5	320	460	10,79	10,99	0,2	42,5

Для определения плотности ρ_2 полученного покрытия разработали 3D-модели по размерам фигур напыления.



а б в

Рис. 4. 3D-модели фигур напыления: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3

Таблица 2

Определение пористости фигуры напыления

№ Образца	Масса фигуры расчетная для алюминия А0, г	Объем расчетный, мм^3	Масса фигуры взвешенная, г	Плотность пятна ρ_2, г/мм^3	Пористость пятна *J*, %
1	0,097759	36,206894	0,04	0,0011	41
2	0,227543	84,275364	0,12	0,0014	52
3	0,439850	162,907247	0,2	0,00158	58

Для определения прочности сцепления фигур напыления с основой разработали приспособление для испытания на сдвиг (рис. 5).

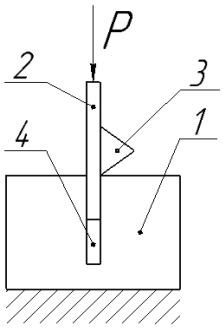


Рис. 5. Схема испытаний на сдвиг фигуры напыления: 1 – упор,
2 – подложка, 3 – фигура напыления, 4 – щель

Подложку 2 с фигурой напыления 3 устанавливали в щель 4 упора 1 и гидравлическим прессом создавали давление на подложку с усилием *P*.

Зная усилия *P* срезания фигуры напыления и площадь *S* ее контакта с подкладкой, находили предел прочности сдвига пятна напыления σ_c по формуле (2)

$$\sigma_c = P / S. \qquad (2)$$

Учитывая то, что поверхность сдвига имеет довольно неправильную форму, для определения площади *S* смещения применили программу Компас. Для этого сфотографировали фигуры напыления сверху, как показано на рис. 6. Вставили это фото в документ программы Компас – 2D в масштабе 1:1. Обвели контур пятна напыления замкнутой кривой Безье, как показано на рис. 6, и с помощью функции измерения площадей программы Компас определили площади контакта фигур напыления 1, 2 и 3 с подложкой.

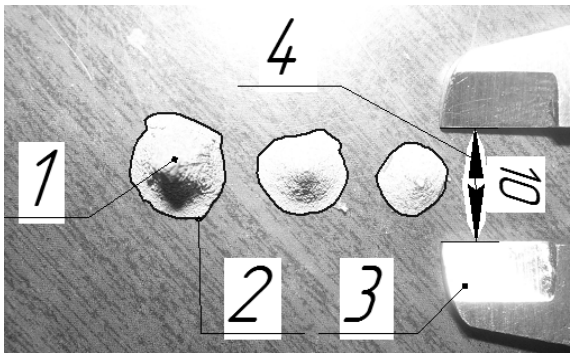


Рис. 6. Определение площади контакта фигур напыления с подложкой:
1 – пятна покрытия (слева направо показаны пятна № 3, 2, 1), 2 – кривая Безье, 3 – губки штангенциркуля,
4 – размер между губками штангенциркуля для определения коэффициента масштабирования фото

Результаты измеренных площадей, силы сдвига фигуры напыления и предела прочности сдвига приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты измеренных площадей и предела прочности сдвига фигуры напыления с подложкой

№ пятна	Площадь контакта фигуры напыления с подложкой, мм^2	Сила *P* в момент сдвига фигуры напыления, Н	Предел прочности сдвига, МПа
1	29,47	173,6	5,79
2	44,69	188,2	4,12
3	58,55	151,5	2,55

Провели металлографические исследования покрытия из порошка алюминия. На рис. 8, 9 показаны соответствующие микрошлифы.

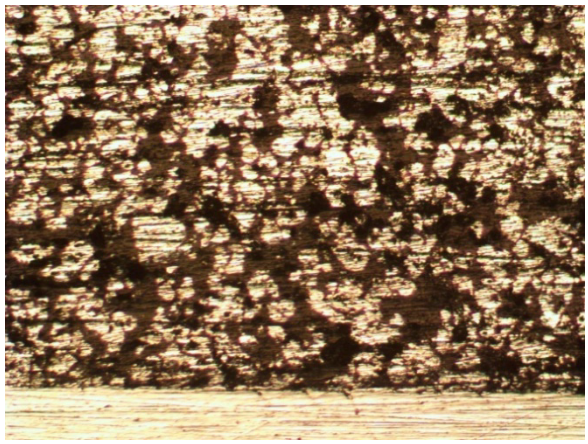


Рис. 8. Микрошлиф покрытия, напыленного алюминиевым порошком, при 80-кратном увеличении

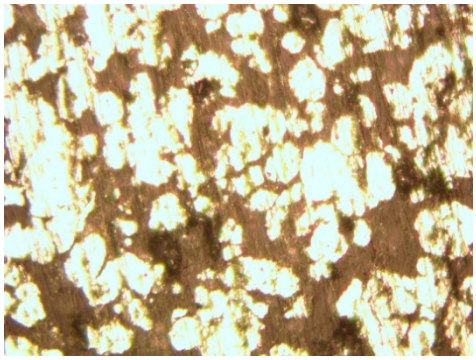
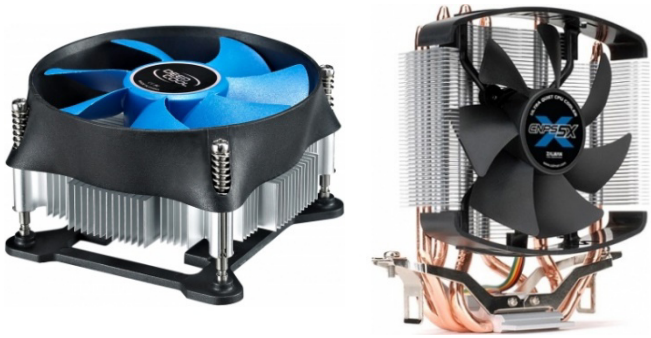


Рис. 9. Микрошлиф покрытия, напыленного алюминиевым порошком, при 200-кратном увеличении

Светлый цвет на микрошлифах – это зерна алюминия, темный цвет – это воздушные полости. Как видно на микрошлифах, воздушные полости сообщаются между собой и являются открытыми. Это позволяет воздуху свободно двигаться по полостях, объединенных в каналы, и обеспечивать эффективный теплообмен с зернами алюминия.

Известно, что эффективность и скорость охлаждения любого нагретого объекта улучшается с увеличением площади поверхности этих объектов. Например, системы охлаждения процессоров имеют специальные ребристые радиаторы (рис. 10) для того, чтобы увеличить площадь поверхности системы охлаждения и предотвратить перегрев процессора.



а б

Рис. 10. Системы охлаждения для процессоров, приспособленные для небольших по размерам корпусов:
а – DeepCool Theta 15 PWM, б – Zalman CNPS5X Performa

Исследованное пористое покрытие аналогично с ребрами-радиаторами систем охлаждения процессоров значительно увеличивает площадь охлаждения за счет

микроскопических открытых полостей (пор) в середине покрытия. Для того, чтобы оценить увеличение эффективной площади охлаждения посчитали длину границ зерен, контактирующих с порами и соответственно осуществляющих теплообмен с воздухом в этих порах. Методика подсчета длин зерен заключалась в обведении границ зерен микрошлифов кривой Безье в программе Компас и в измерении длин этих кривых. Схема подсчета длины границ зерен микрошлифов покрытия из алюминиевого порошка показана на рис. 11.

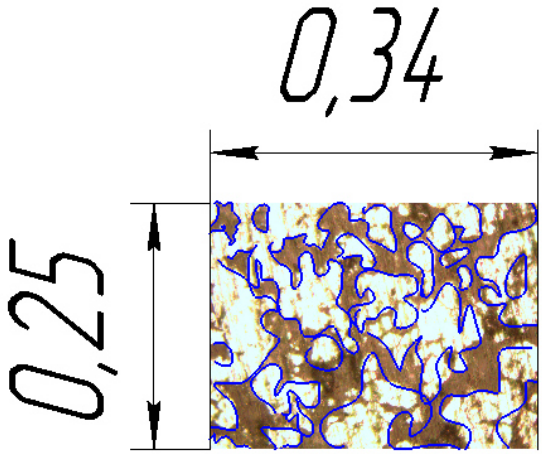


Рис. 11. Схема подсчета длины границ зерен на микрошлифе покрытия алюминиевого порошка. Размер снимка микрошлифа: 0,34 х 0,25 мм

Сумма длины линий границ зерен (синего цвета) = 4,8 мм (рис. 11).

Если принять площадь поверхностей внутри пористого покрытия прямо пропорциональной длине границ зерен микрошлифа, то можно считать, что на прямолинейном участке детали, покрытой пористым покрытием длиной 0,34 мм при толщине покрытия 0,25 мм, дополнительно образовалась активная поверхность площадью, пропорциональной длине границ зерен, сумма которых составляет 4,8 мм. То есть, активная площадь, способная улучшить теплообмен, увеличилась в 4,8 / 0,34 = 14 раз. Кроме того, пористое покрытие создается из алюминия и может наноситься на стальные поверхности, а также на поверхности из цветных металлов, что может способствовать значительному сокращению затрат на изготовление систем охлаждения микропроцессорной и другой техники.

Выводы

В результате проведенного исследования установили, что с увеличением температуры напыления с 320 до 460 ° С коэффициент использования порошка увеличился с 8 до 42,5%, одновременно предел прочности на сдвиг фигуры напыления с подложкой уменьшился с 5,79 до 2,55 МПа, при этом пористость полученного покрытия увеличилась с 41 до 58%. То есть половина объема покрытия занимают воздушные полости, объединенные в каналы, по которым может свободно двигаться воздух и соответственно отбирать тепло у нагретого объекта.

Полученные покрытия могут быть применены для интенсификации процесса охлаждения объектов, которые в процессе эксплуатации подвергаются значительному нагреву, например, процессоры компьютерной техники и другие элементы.

Появляется перспектива снижения веса систем охлаждения за счет уменьшения или ликвидации оребрения радиаторов.

Значительный рост площади охлаждения за счет дополнительных поверхностей пористого покрытия приведет к уменьшению и упрощению конструкции систем охлаждения процессоров на другой компьютерной технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2237746 Российская Федерация, МПК С 23 С 24/04. Способ газодинамического нанесения покрытий и устройство для его осуществления / Каширин А. И., Клюев О. Ф., Шкодкин А. В. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченнойответственностью «Обнинский центр порошкового напыления». – № 2003100745/02 ; заявл. 14.01.03 ; опубл. 10.10.04, Бюл. №28.

2. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / [Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М.]. ; под ред. В. М. Фомина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 536 с. ISBN 978-5-9221-1210-9.

3. Пат. 110552 Україна, МПК С 23 С 24/00. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу / Гайдамак О. Л. ; заявник та патентовласник Гайдамак О. Л. – № а 201405543 ; заявл. 23.05.14 ; опубл. 12.01.16, Бюл. №1.

Гайдамак Олег Леонидович – к. т. н., доцент кафедры технологии повышения износостойкости.

Савуляк Валерий Иванович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии повышения износостойкости.

Винницкий национальный технический университет.