

УДК 621.793.7:669.721.5

А. В. ШОРИНОВ, С. Е. МАРКОВИЧ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Выполнен поиск оптимальных параметров процесса холодного газодинамического напыления низкого давления для получения максимальной эффективности формирования защитно-восстановительных покрытий на магниевые сплавы. Установлено влияние параметров холодного напыления, а именно температуры и давления торможения газа, а также дистанции напыления, на температурно-скоростные параметры частицы в процессе напыления. Установлено, что изменение температуры торможения газа оказывает наибольшее влияние на скорость частиц, и, как следствие, эффективность формирования покрытий. Полученные результаты являются основой для разработки технологических рекомендаций формирования защитно-восстановительных покрытий.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, эффективность напыления, параметры напыления, критическая скорость

Введение

Технология холодного газодинамического напыления является одним из методов газотермического напыления. Технология основывается на ускорении до высоких скоростей (до 1200 м/с) частиц металлического порошка размером 1...50 мкм в сверхзвуковом газовом потоке в сопле Лавалья [1]. Холодное газодинамическое напыление разделяется на два вида в зависимости от рабочего давления [2]:

- холодное газодинамическое напыление высокого давления (ХГНВД), рабочее давление выше 1,5 МПа;
- холодное газодинамическое напыление низкого давления (ХГННД), рабочее давление до 1 МПа.

Формирование покрытия происходит при соударении частиц с высокой кинетической энергией в твердом состоянии (температура значительно ниже температуры плавления материала) о подложку; частицы порошка деформируются с образованием связей с подложкой и между собой, образуя плотную структуру покрытия.

Отсутствие высоких температур при напылении и плавления материала порошка, и как следствие, практически отсутствие окисления, пористости, фазовых превращений, температурных деформаций, является основным преимуществом процесса ХГН в сравнении с другими методами газотермического напыления [5].

Одной из актуальных задач развития технологии ХГННД и ее широкого применения в различ-

ных отраслях промышленности, является возможность получения покрытий с наперед заданными свойствами с максимальной эффективностью напыления, основываясь на изучении комплексных параметров процесса напыления.

1. Постановка задачи

Одной из важных характеристик процесса ХГН является эффективность напыления. Ее зависимость от параметров процесса напыления (температура и давление торможения потока, материал, форма и размер частиц порошка, дистанция и угол напыления, тип рабочего газа и др.) позволяет более глубоко понять природу процесса холодного газодинамического напыления, и как следствие, установить, как эти параметры влияют на свойства покрытия. Эффективность напыления обычно определяется как отношение прироста массы образца $m_{\text{пок}}$ (масса покрытия) к массе использованного для получения данного покрытия порошка $m_{\text{пор}}$ выражается в процентах [6]:

$$\text{ЭН} = \left(\frac{m_{\text{пок}}}{m_{\text{пор}}} \right) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Достаточно хорошо известно, что формирование покрытий при ХГН осуществляется в результате высокоскоростного соударения частиц порошка о поверхность подложки с последующей их деформацией [10-12]. Возникающая адиабатическая не-

устойчивость сдвига обеспечивает достаточное течение материала и нагрев для формирования связей на границе частицы и подложки [10]. Обязательным условием для формирования покрытия является скорость соударения частицы. Образование связей происходит при условии, если скорость соударения частицы V_{pi} превышает критическое значение V_{cr} [13-15].

Зависимость скорости частиц от большого количества факторов, затрудняет выбор оптимальных параметров напыления, и определение влияния комплексных параметров процесса ХГН на эффективность процесса формирования покрытий является актуальной задачей развития технологии.

Ранее проведенные работы по изучению газодинамики процесса ХГН, соударения частиц о подложку, а также свойств покрытий, позволили выделить параметры, в большей степени влияющие на процесс напыления: температура [17] и давление торможения воздуха [18], дистанция напыления [19], материал напыляемого порошка и размер частиц [20]. Тем не менее, остается открытым вопрос определения оптимальных параметров для достижения максимальной эффективности формирования покрытий.

Целью работы является поиск оптимальных параметров процесса холодного газодинамического напыления низкого давления для получения максимальной эффективности формирования покрытий.

Для достижения поставленных целей необходимо решение следующих задач:

- определить связь между температурой и давлением воздуха на входе в сопло, а также дистанцией напыления, со скоростью и температурой частиц;

- установить влияние параметров процесса ХГН, а именно температуры, давления и дистанции напыления на эффективность процесса формирования покрытий.

2. Материалы и методы исследования влияния параметров процесса ХГН на эффективность напыления

2.1. Используемое оборудование и материалы

Образцы с покрытием для исследования влияния параметров холодного газодинамического напыления низкого давления на эффективность процесса были получены с использованием установки ХГН НД ДИМЕТ-405.

В качестве напыляемого материала в данном исследовании была выбрана коммерчески доступная порошковая смесь А-20-11 на основе алюминия ($Al+Zn+30$ об. % Al_2O_3), используемая при ХГН НД.

На рис. 1 представлен микроснимок используемого порошка А-20-11. Частицы алюминия и цинка, входящие в состав порошковой смеси, получены распылением и имеют сферическую форму, в то время как порошок Al_2O_3 получен измельчением с неправильной, остроугольной формой частиц. Порошковая смесь получена механическим смешиванием в определенных пропорциях.

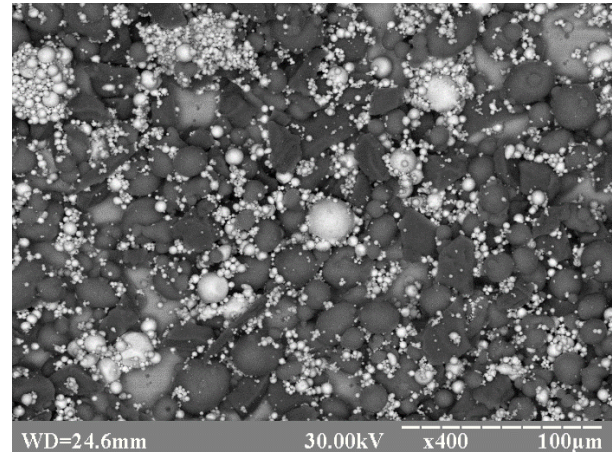


Рис. 1. Микроснимок используемой порошковой смеси А-20-11

Материал подложки в данной работе во всех случаях был выбран литейный магниевый сплав МЛ10. Форма используемых образцов – пластины размером $50 \times 25 \times 1,5$ (Д \times Ш \times В, мм). Перед напылением покрытий образцы подвергались пескоструйной обработке корундом и обезжириванию.

2.2. Методика определения эффективности напыления и планирование эксперимента

Как было отмечено ранее, эффективность напыления – это отношение прироста массы образца (масса покрытия) к массе использованного для получения данного покрытия порошка и выражается в процентах.

С целью изучения влияния параметров процесса ХГН НД на эффективность напыления и поиска оптимальных параметров для достижения максимальной эффективности, была проведена серия экспериментов. Для получения необходимых данных при минимальном числе опытов использовалась теория планирования эксперимента, а для реализации всех возможных, неповторяющихся комбинаций уровней факторов, был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ).

В качестве параметра оптимизации была выбрана эффективность напыления. Из анализа литературных источников и по результатам однофакторных экспериментов были выделены для дальнейше-

го исследования следующие факторы, влияющие на эффективность процесса напыления: температура (T_0) и давление (P_0) воздуха на входе в сопло, а также дистанция напыления (x) (табл. 1). Остальные факторы зафиксированы: расход порошка – 4 г/мин; скорость перемещения пистолета – 10 мм/с; количество проходов – 3.

Таблица 1

Значение уровней и интервалов варьирования факторов

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	1	
T_0 , °C	300	450	600	150
P_0 , МПа	0,7	8,5	1,0	1,5
x , мм	10	15	20	5

Проводился эксперимент типа 2^3 , где число факторов $k=3$, число уровней $r=2$, число опытов $N=8$, число повторных опытов $n=2$. Для анализа результатов экспериментов, обработки статистических данных и их интерпретации использовался программный пакет Minitab – "Планирование эксперимента (DOE)".

3. Результаты исследований эффективности напыления

По результатам проведенного эксперимента была рассчитана эффективность напыления алюминиевого покрытия на магниевую подложку на разных режимах напыления. На рис. 2 представлен снимок образцов с покрытиями, а результаты расчета эффективности напыления приведены в табл. 2.

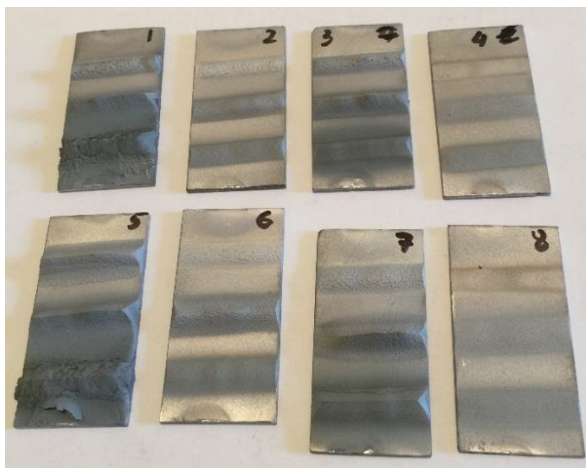


Рис. 2. Снимок образцов с покрытиями

Для определения воздействия каждого из трёх факторов (температура, давление, дистанция напыления) на отклик (эффективность напыления) и их

взаимодействие, полученные данные были обработаны с использованием программы MINITAB. Графики воздействия факторов на эффективность напыления представлены на рис. 3.

Таблица 2

Результаты расчета эффективности напыления покрытий

№ эксп.	Параметры напыления			Эффективность напыления, %
	T_0 , °C	P_0 , МПа	x , мм	
1	600	1	10	36,8
2	300	1	10	11,8
3	600	0,7	10	33,3
4	300	0,7	10	2,9
5	600	1	20	23,1
6	300	1	20	5,9
7	600	0,7	20	16,7
8	300	0,7	20	5,0

Увеличение температуры воздуха, давления, а также уменьшение дистанции напыления приводит к росту эффективности напыления.

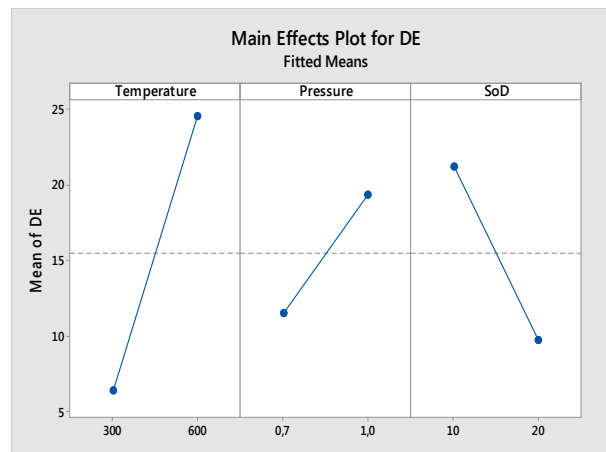


Рис. 3. Графики главных эффектов

В результате можно сделать вывод, что максимальная эффективность процесса холодного напыления низкого давления для порошковой смеси на основе алюминия А-20-11 равная 36,8 %, будет получена при температуре торможения 600 °C, давлении 1,0 МПа и дистанции напыления 10 мм.

4. Обсуждение результатов исследований влияния параметров процесса на эффективность напыления

Как видно из полученных результатов экспериментов, изменение значений температуры и давления воздуха, а также дистанции напыления влечет за собой изменение эффективности процесса холодного газодинамического напыления. Изучаемые

параметры оказывают влияние на скорость и температуру напыляемых частиц, что имеет большое значение для процесса ХГН.

При увеличении скорости газового потока увеличивается скорость частиц порошка, находящегося в этом потоке. Скорость звука для газа зависит от температуры и молекулярной массы газа:

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T}, \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура потока.

Из уравнения видно, что для того, чтобы увеличить скорость потока (a вместе с тем и скорость частиц), необходимо увеличить температуру или использовать газ с меньшей молекулярной массой, например, гелий. Увеличение давления не влияет на скорость, а приводит к изменению плотности газа, а вместе с этим оказывает влияние на силу лобового сопротивления и ускорения частиц [22].

Как видно из рис. 3, среди исследуемых параметров температура воздуха оказывает наибольшее влияние на значение эффективности процесса напыления. Увеличение температуры с 300 до 600 °С влечет за собой увеличение эффективности напыления с 11,8 до 36,8 % (рост эффективности напыления на 25 %) при постоянном давлении 1 МПа и дистанции напыления 10 мм.

Изменение давления воздуха на входе в сопло оказывает меньшее влияние на эффективность напыления в сравнении с влиянием температуры. Так, с ростом давления с 0,7 МПа до 1,0 МПа эффективность напыления изменяется с 33,3 до 36,8 % (рост эффективности напыления на 3,5 %) при постоянной температуре 600 °С и дистанции напыления 10 мм.

С уменьшением дистанции напыления с 20 до 10 мм, эффективность напыления растет с 23,1 до 36,8 % (рост эффективности напыления на 13,7 %) при постоянной температуре 600 °С и давлении 1 МПа.

Увеличение эффективности напыления можно объяснить при сравнении скоростей и температур частицы при температурах торможения воздуха 300 и 600 °С.

Скорость частицы можно рассчитать при помощи уравнения [23]:

$$V_p \frac{dV_p}{dz} = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho (v - V_p) |v - V_p|}{\rho_p d_p}, \quad (3)$$

где V_p – скорость частицы;

C_d – коэффициент сопротивления частицы,

v – скорость потока;

ρ_p – плотность частицы;

d_p – диаметр частицы.

Температура частицы рассчитывается по формуле:

$$\rho_p V_p C_p = Nu \frac{6\lambda}{d_p^2} (T - T_p), \quad (4)$$

где T_p – температура частицы;

Nu – число Нуссельта;

λ – длина волны между двумя соседними вершинами распространения волны (8 мм);

C_p – удельная теплоемкость.

Для расчёта температурно-скоростных параметров потока в сопле и на выходе из него при холодном газодинамическом напылении, можно воспользоваться одномерной изэнтропической моделью, представленной в работе [23]. Результаты расчета скорости и температуры частицы алюминия сферической формы диаметром 22 мкм при температуре торможения воздуха 300 и 600 °С приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

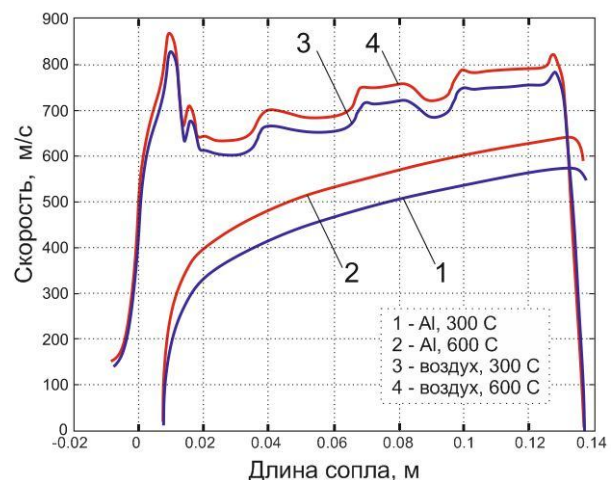


Рис. 4. Расчётные значения скорости частицы алюминия диаметром 22 мкм при T_0 300 и 600 °С

Как видно из рис. 4 и рис. 5, с ростом температуры воздуха от 300 до 600 °С, скорость частицы увеличивается с 454 до 547 м/с, а температура с 352 до 430 К.

Большие скорости и температуры частиц приводят к интенсивным пластическим деформациям при соударении частиц о подложку и возникновению явления неустойчивой сдвиговой неустойчивости с которой связывают механизм адгезии при ХГН [24].

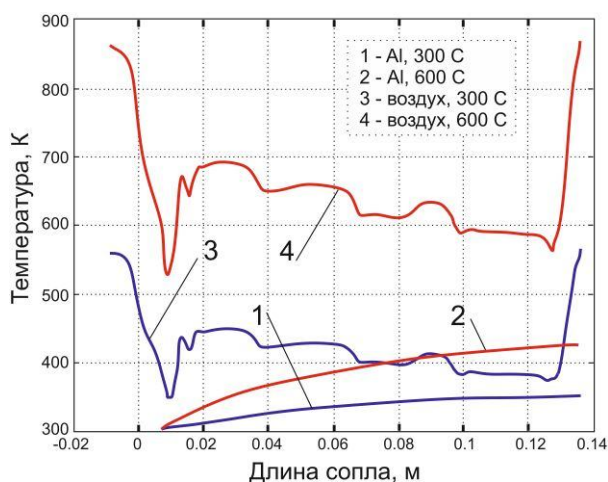


Рис. 5. Расчетные значения температуры частицы алюминия диаметром 22 мкм при T_0 300 и 600 °C

При адиабатическом течении материала энергия пластической деформации рассеивается в тепло, что приводит к увеличению температуры и термическому разупрочнению. Предполагается, что разупрочнение и сдвиговая локализация оказывают значительную роль при образовании связи между частицей и подложкой при ХГН. Сдвиговая локализация и связанное с ней формирование при контактной струе, приводит к образованию чистых контактных поверхностей, что приводит к образованию связей [24].

Выводы

Управление эффективностью процесса холодного газодинамического напыления является актуальной задачей развития технологии и ее внедрению в производство. Достижение максимальной эффективности напыления порошков позволяет получать покрытия с меньшей себестоимостью. Оптимизация процесса напыления является важным и необходимым этапом разработки технологии холодного напыления.

В работе выполнен анализ влияния температуры и давления торможения воздуха, а также дистанции напыления на скорость и температуру частиц алюминиевого порошка сферической формы частиц и диаметром 22 мкм. Показано, что изменение температуры потока оказывает наибольшее влияние на изменение скорости частиц. Так, с ростом температуры с 300 до 600 °C скорость частицы увеличивается с 454 до 547 м/с, а температура с 352 до 430 К. При этом эффективность напыления возрастает на 25 % (с 11,8 до 36,8%).

Увеличение температуры и, как следствие, скоростей частиц, приводит к увеличению эффективности напыления. Также заметное влияние оказывает и

изменение дистанции от выходного сечения сопла до подложки. С увеличением дистанции скорость частиц заметно падает и приводит к снижению эффективности напыления. Изменение давления оказывает наименьшее влияние по сравнению с температурой и дистанцией напыления.

В результате проведенной работы определены оптимальные параметры процесса ХГН для достижения максимальной эффективности напыления (36,8 %) порошковой смеси на основе алюминия А-20-11 на магниевую подложку: $T_0=600$ °C, $P_0=1$ МПа и дистанция напыления 10 мм. Полученные результаты являются основой для разработки технологических рекомендаций и процессов формирования защитно-восстановительных покрытий на детали авиационной техники из магниевых сплавов при их ремонте в результате коррозии, износа, механических повреждений и т.д. Дальнейшая оптимизация геометрии сопла, состава порошковой смеси и размера частиц необходима для получения большей эффективности напыления.

Литература

1. *Cold spray technology [Text] / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov et al // Elsevier Science; 1 edition, 2006. – 336 p.*
2. *Villafuerte, J. Modern cold spray: materials, process, and applications [Text] / J. Villafuerte. – Springer, 2015. – 429 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16772-5.*
3. *Cavaliere, P. Cold-spray coatings [Text] / P. Cavaliere. – Springer, 2018. – 570 p. DOI: 10.1007/978-3-319-67183-3.*
4. *Spencer, K. The use of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys [Text] / K. Spencer, D. M. Fabijanic, M. X. Zhang // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 204, № 4. – P. 336-344. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.032.*
5. *Karthikeyan, J. The advantages and disadvantages of the cold spray coating process [Text] / J. Karthikeyan // The cold spray materials deposition process. A volume in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. – 2007. – P. 62-71. DOI: 10.1533/9781845693787.1.62.*
6. *Klinkov, S. V. Measurements of cold spray deposition efficiency [Text] / S. V. Klinkov, V. F. Kosarev // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – Vol. 15, № 3. – P. 364-371. DOI: 10.1361/105996306X124365.*
7. *Prisco, U. Size-dependent distributions of particle velocity and temperature at impact in the cold-gasdynamic-spray process [Text] / U. Prisco // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 216. – P. 302-314. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.013.*
8. *Alkhimov, A. P. The features of cold spray nozzle design [Text] / A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev,*

- S. V. Klinkov // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2001. – Vol. 10, № 2. – P. 375-381. DOI: 10.1361/105996301770349466.
9. Klinkov, S. V. *Influence of Surface Activation on Cold Spray Process [Text]* / S. V. Klinkov, V. F. Kosarev // *Physical Mesomechanics*. – 2003. – Vol. 6, № 3. – P. 85-90.
10. *Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying [Text]* / H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff at all // *Acta Mater.* – 2003. – Vol. 51. – P. 4379-4394.
11. *Kinetics of composite coating formation process in cold spray: modelling and experimental validation [Text]* / A. Sova, R. Maestracci, M. Jeandin at all // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 318. – P. 309-314. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.084.
12. Shah, S. *Numerical Simulations of the High-Velocity Impact of a Single Polymer Particle During Cold-Spray Deposition [Text]* / S. Shah, J. Lee, J. P. Rothstein // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2017. – Vol. 26, № 5. – P. 970-984. DOI: 10.1007/s11666-017-0557-2.
13. Dykhuizen, R. C. *Gas Dynamic Principles of Cold Spray [Text]* / R. C. Dykhuizen, M. F. Smith // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1998. – Vol. 7, № 2. – P. 205-212. DOI: 10.1361/105996398770350945.
14. Meng, F. *Quantitative prediction of critical velocity and deposition efficiency in cold-spray: a finite-element study [Text]* / F. Meng, S. Yue, J. Song // *Scripta Materialia*. – 2015. – Vol. 107. – P. 83-87. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.05.026.
15. *A generalized critical velocity window based on material property for cold spraying by Eulerian method [Text]* / W. Y. Li, M. Yu, F. F. Wang at all // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol. 23, № 3. – P. 557-566. DOI: 10.1007/s11666-013-0023-8.
16. *Development of a generalized parameter window for cold spray deposition [Text]* / T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi at all // *Acta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, № 3. – P. 729-742. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
17. Cavaliere, P. *Processing parameters affecting cold spray coatings performances [Text]* / P. Cavaliere, A. Silvello // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 71, № 1-4. – P. 263-277. DOI: 10.1007/s00170-013-5465-0.
18. *Effect of injection pressure on particle acceleration, dispersion and deposition in cold spray [Text]* / S. Yin, Q. Liu, H. Liao at all // *Computational Materials Science*. – 2014. – Vol. 90. – P. 7-15. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.03.055.
19. *Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying [Text]* / W.-Y. Li, C. Zhang, X. P. Guo at all // *Materials & Design*. – 2008. – Vol. 29, № 2. – P. 297-304. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.02.005.
20. *The influence of feedstock powders on the CGS deposition efficiency of bondcoats for TBCs [Text]* / V. Crespo, I. G. Cano, S. Dosta at all // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 622. – P. 394-401. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.09.216.
21. *Rodrigues, M. I. Experimental Design and Process Optimization [Text]* / M. I. Rodrigues, A. F. Emma. – CRC Press, 2014. – 302 p.
22. *Champagne, V. K. The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications [Text]* / V. K. Champagne. – Woodhead Publishing, 2007. – 376 p.
23. *Dykhuizen, R. C. Gas dynamic principles of cold spray [Text]* / R. C. Dykhuizen, M. F. Smith // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1998. – Vol. 7, No. 2. – P. 205-212. DOI: 10.1361/105996398770350945.
24. *Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process [Text]* / M. Grujicic, C. L. Zhao, W. S. DeRosset at all // *Materials & Design*. – 2004. – Vol. 25, № 8. – P. 681-688. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.03.008.

References

1. Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., Fomin, V. M. *Cold spray technology*. Elsevier Science, 1 edition, 2006. 336 p.
2. Villafuerte, J. *Modern cold spray : materials, process, and applications*. Springer, 2015. 429 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16772-5.
3. Cavaliere, P. *Cold-spray coatings*. Springer, 2018. 570 p. DOI: 10.1007/978-3-319-67183-3.
4. Spencer, K., Fabijanic D. M., Zhang, M. X. *The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys*. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 204, no. 4, pp. 336-344. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.032.
5. Karthikeyan, J. *The advantages and disadvantages of the cold spray coating process*. *The cold spray materials deposition process. A volume in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, 2007, pp. 62-71. DOI: 10.1533/9781845693787.1.62.
6. Klinkov, S. V., Kosarev, V. F. *Measurements of cold spray deposition efficiency*. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, vol. 15, no. 3, pp. 364-371. DOI: 10.1361/105996306X124365.
7. Prisco, U. *Size-dependent distributions of particle velocity and temperature at impact in the cold-gas dynamic-spray process*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 216, pp. 302-314. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.013.
8. Alkhimov, A. P., Kosarev, V. F., Klinkov, S. V. *The features of cold spray nozzle design*. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, no. 2, pp. 375-381. DOI: 10.1361/105996301770349466.
9. Klinkov, S. V., Kosarev, V. F. *Influence of Surface Activation on Cold Spray Process*. *Physical Mesomechanics*, 2003, vol. 6, no. 3, pp. 85-90.

10. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying. *Acta Mater*, 2003, vol. 51, pp. 4379-4394.
11. Sova, A., Maestracci, R., Jeandin, M., Bertrand, P. Kinetics of composite coating formation process in cold spray: modelling and experimental validation. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 318, pp. 309-314.
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.084.
12. Shah, S., Lee, J., Rothstein, J. P. Numerical Simulations of the High-Velocity Impact of a Single Polymer Particle During Cold-Spray Deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 970-984.
DOI: 10.1007/s11666-017-0557-2.
13. Dykhuizen, R. C., Smith, M. F. Gas Dynamic Principles of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, no. 2, pp. 205-212.
DOI: 10.1361/105996398770350945.
14. Meng, F., Yue, S., Song, J. Quantitative prediction of critical velocity and deposition efficiency in cold-spray: a finite-element study. *Scripta Materialia*, 2015, vol. 107, pp. 83-87.
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.05.026.
15. Li, W. Y., Yu, M., Wang, F. F., Yin, S., Liao, H. L. A generalized critical velocity window based on material property for cold spraying by Eulerian method. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 557-566.
DOI: 10.1007/s11666-013-0023-8.
16. Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., Kreye, H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, no. 3, pp. 729-742.
DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
17. Cavaliere, P., Silvello, A. Processing parameters affecting cold spray coatings performances. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 71, no. 1-4, pp. 263-277.
DOI: 10.1007/s00170-013-5465-0.
18. Yin, S., Liu, Q., Liao, H., Wang, X. Effect of injection pressure on particle acceleration, dispersion and deposition in cold spray. *Computational Materials Science*, 2014, vol. 90, pp. 7-15.
DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.03.055.
19. Li, W.-Y., Zhang, C., Guo, X. P., Zhang, G., Liao, H. L., Li, C.-J., Coddet, C. Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying. *Materials & Design*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 297-304. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.02.005.
20. Crespo, V., Cano, I. G., Dosta, S., Guilemany, J. M. The influence of feedstock powders on the CGS deposition efficiency of bond coats for TBCs. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 622, pp. 394-401.
DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.09.216.
21. Rodrigues, M. I., Emma, A. F. Experimental Design and Process Optimization. *CRC Press*, 2014. 302 p.
22. Champagne, V. K. The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications, *Woodhead Publishing*, 2007. 376 p.
23. Dykhuizen, R. C., Smith, M. F. Gas dynamic principles of cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, no. 2, pp. 205-212.
DOI: 10.1361/105996398770350945.
24. Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W. S., Helfrich, D. Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials & Design*, 2004, vol. 25, no. 8, pp. 681-688.
DOI: 10.1016/j.matdes.2004.03.008.

Поступила в редакцію 31.05.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018

КЕРУВАННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО НАПИЛЮВАННЯ ЗАХИСНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА МАГНІЄВІ СПЛАВИ

О. В. Шорінов, С. Є. Маркович

Актуальним завданням розвитку технології холодного газодинамічного напилювання низького тиску і її широкого застосування в авіаційній, автомобільній та інших галузях промисловості, є можливість отримання покриттів з наперед заданими властивостями з максимальною ефективністю напилювання. Для цього необхідно вивчення впливу комплексних параметрів процесу напилювання.

Важливою характеристикою процесу холодного напилювання є ефективність напилювання-відношення приросту маси зразка (маса покриття) до маси використаного для отримання даного покриття порошку. Залежність ефективності напилювання від параметрів процесу напилювання, таких як температура і тиск гальмування потоку, матеріал, форма і розмір частинок порошку, дистанція напилювання та інші, дозволяє більш глибоко зрозуміти природу процесу холодного газодинамічного напилювання, і як наслідок, встановити як ці параметри впливають на властивості покриттів.

В роботі встановлено вплив температури, тиску і дистанції напилювання на ефективність процесу формування покриттів на підкладці з магнієвого сплаву з використанням порошкової суміші на основі алюмінію. В результаті розрахунку ефективності напилювання були отримані оптимальні параметри процесу, щоб забезпечити отримання максимальної ефективності. Встановлено, що зміна температура гальмування повітря має найбільший вплив на ефективність формування покриттів. Дистанція напилювання є другим за впливом параметром, а зміна робочого тиску має найменший вплив. Показано, що зі збільшенням температури

відбувається зростання швидкостей частинок в процесі напилювання, оскільки місцева швидкість звуку в соплі залежить від температури потоку.

Отримані результати є основою для розробки технологічних рекомендацій і процесів формування захисно-відновлювальних покриттів на деталі авіаційної техніки з магнієвих сплавів при їх ремонті в результаті корозії, зносу, механічних та інших пошкоджень. Подальша оптимізація геометрії сопла, складу порошкової суміші і розмір у часток необхідна для отримання більшої ефективності напилювання.

Ключові слова: холодне газодинамічне напилювання, ефективність напилювання, параметри напилювання, критична швидкість

COLD SPRAY DEPOSITION EFFICIENCY CONTROL OF PROTECTIVE AND RESTORATIVE COATINGS ON MAGNESIUM ALLOYS

O. V. Shorinov, S. E. Markovych

The crucial task of developing the technology of low pressure cold gas–dynamic spraying and its wide application in the aviation, automotive and other industries is the possibility of obtaining coatings with given properties and deposition efficiency as great as practicable. To do this requires it is necessary to study the effect of complex parameters on coating deposition.

An important characteristic of cold gas–dynamic spraying is deposition efficiency – the ratio of weight increment of the sample (weight of the coating) to the weight of powder used to produce the coating. Dependence of the deposition efficiency on the parameters of cold spraying, such as gas stagnation temperature and total pressure, material, shape and size of the powder particles, stand–of–distance, etc., allows a deeper understanding of the nature of the cold gas–dynamic spraying process, and as a consequence, to establish how these parameters effect on coating properties.

The effect of stagnation temperature, total pressure and stand–of–distance on the cold spraying coating deposition efficiency on magnesium alloy utilized powder mixture based on aluminum was established. As a result of the deposition efficiency calculation, the optimal sputtering parameters ensuring the maximum deposition efficiency were established. It is shown that changing of the stagnation temperature has the greatest effect on the efficiency of coating formation. Stand–of–distance is the second most influential parameter, and the change in working pressure has the least effect. It is shown that with increasing temperature, the particle velocities increase during the deposition process, since the local speed of sound in the nozzle depends on the local flow temperature.

The obtained results are the basis for the development of technological recommendations and processes for the formation of protective and restorative coatings on aeronautical part made of magnesium alloys during maintenance, repair and overhaul. Further optimization of the geometry of the nozzle, the composition of the powder mixture and the particle size is necessary to obtain deposition efficiency as great as practicable.

Keywords: cold gas–dynamic spraying, deposition efficiency, spraying parameters, critical velocity

Шоринов Александр Владимирович – младший научный сотрудник кафедры технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: shorinov1@gmail.com.

Маркович Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: motor.khai@gmail.com.

Shorinov Oleksandr Volodymyrovych – junior researcher of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: shorinov1@gmail.com.

Markovych Sergey Evgenievich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: motor.khai@gmail.com.