



Каналес О.,
Шоринов А. В.,
Волков А. О.,
Маркович С. Е.,
Долматов А. И.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЧАСТИЦ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе выполнен расчет параметров деформации частиц никеля при соударении о подложку при холодном газодинамическом напылении низкого давления. Представлен новый подход расчета деформации частиц, основанный на результатах металлографических исследований. Результаты показали, что существует высокая вероятность плавления частиц в зоне больших деформаций и наличие эффекта трамбования керамическими частицами частиц металла при напылении металлокерамической смеси.

Ключевые слова: холодное напыление, деформация, динамический предел текучести, покрытие, анализ микроструктуры.

1. Введение

Технология холодного газодинамического напыления является относительно новой отраслью среди процессов газотермического напыления. Уникальность процесса в том, что напыленный материал порошка не нагревается до высоких температур, а, следовательно, уменьшается окисление покрытия, отсутствуют фазовые изменения материала и значительный нагрев подложки. При холодном напылении главной характерной особенностью формирования покрытий является соударение частиц. Не смотря на большие усилия, направленные на лучшее понимание механизма сцепления при холодном напылении, процесс формирования покрытия до сих пор полностью не изучен [1]. Существуют две основные характерные черты явления соударения: 1) взаимодействие частиц с поверхностью подложки и предварительное закрепление частиц при напылении, и 2) ударное сжатие слоев частиц. Известно, что ударное сжатие в высокой степени активизируется в том случае, когда порошок находится в виде смеси, где взаимодействие смеси порошка увеличивается с наличием дислокаций, коротких диффузионных расстояний, более плотного контакта между очищенной частицей и поверхностью, что обычно содействует реакции диффузии [2]. В настоящее время модели, описывающие деформацию частицы во время соударения, не были экспериментально подтверждены, особенно в случаях, когда они были разработаны используя данные для объемного материала вместо свойств микрочастиц. В этой работе изучена деформация частиц после соударения с алюминиевой подложкой с измерением средней деформации напыленных частиц. Так как деформация частиц измеряется непосредственно из анализа микроструктуры, следовательно в расчетах учитывается вся энергия системы, включая эффект трамбования ударяющихся частиц. В этом состоит отличие от предыдущих работ по изучению

деформации частиц, в которых расчеты проводились только для одной частицы.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Считается, что формирование покрытия должно быть изучено с энергетической точки зрения. Очевидно, что формирование покрытия является результатом деформации частиц после того, как кинетическая энергия, переносимая частицами, переходит в пластическую работу. Также известно, что во время формирования покрытия происходят различные процессы рассеивания энергии: пластическая деформация, трение меж частицами, микро кинетическая энергия и нагрев [1]. По этой причине много авторов моделировали процесс образования покрытия используя модели энергетического баланса. В работах [3, 4] была изучена деформация частиц при соударении, и несмотря на недостаток знаний о механизме формирования покрытия, они сходятся на том, что деформационное размягчение, сопровождаемое локализацией сдвига (неустойчивостью сдвига) находится в определенной связи с критической скоростью напыления частиц, и далее означает начало формирования покрытия. В работе [5] явление неустойчивости сдвига объясняется на основе экспериментов, проведенных Райтом [6, 7]. Райт представил явления неустойчивости сдвига на простом физическом уровне при помощи кривых динамики напряжения деформации, полученных в результате экспериментов Кольского. В работе показано, что для обычного деформационного упрочнения материала отмечается монотонное увеличение динамического предела текучести, сопровождаемого деформацией. С другой стороны, при адиабатных условиях энергия, используемая для деформации, рассеивается в виде тепла, увеличивая температуру материала и является причиной размягчения. В идеальном материале, где распределение напряжения,

температуры и др., деформация может продолжаться бесконечно; в реальном материале, где колебания в напряжении, деформации и температуре могут являться причиной локализации сдвига и по причине нагрева, напряжение текучести падает до нуля. Необходимо также отметить, что деформация частиц есть функция многократных соударений частиц, вызывающих эффект «трамбования», так как полная энергия, использованная для пластической работы частиц, значительно больше, чем кинетическая энергия, переносимая единичной частицей, поскольку источником энергии для пластической деформации является трение между частицами и кинетическая энергия керамических частиц, которые не деформируются и, в некоторых случаях, являются причиной образования трещин.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования – анализ параметров деформации частиц, таких как динамический предел текучести, температура и пластическая работа при соударении о подложку при холодном газодинамическом напылении низкого давления.

Цель данной работы – вычисление параметров деформации, таких как динамический предел текучести, температура между частицами и пластическая работа частиц никеля при их соударении о подложку при холодном газодинамическом напылении низкого давления. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Нанесение покрытия порошка N7-00-14, полученного из Обнинского центра порошкового напыления (ОЦПН) на установку холодного напыления низкого давления ДИМЕТ 405.
2. Анализ микроструктуры полученных покрытий и измерение деформации.
3. Разработка математической модели динамического предела текучести, температуры взаимосвязанных частиц и их пластической работы при соударении о подложку.

4. Материалы и методы исследований деформации частиц

Для анализа деформации частиц с использованием установки холодного напыления низкого давления ДИМЕТ 405 была разработана упрощенная модель сохранения энергии. Данная модель используется с целью определения температуры поверхности контактного взаимодействия напыляемых частиц и оценки возможности плавления материала в зоне высоких напряжений, предела текучести материала частиц при деформации, энергетического баланса между кинетической энергией частицы и ее пластической работой, выполняемой при деформации вместе с выявлением влияния пластикации материалов для холодного напыления. В модели приняты следующие допущения [5, 6, 8–15]:

- Все частицы, не зависимо от их диаметра, вызывают одинаковую деформацию ϵ_f , измеренную при помощи металлографии для каждого режима напыления с разной начальной температурой.
- Скорость частицы во время соударения уменьшается линейно, начиная от скорости V_{pi} до $V_p=0$

на протяжении всего времени взаимодействия t_c .

- Время взаимодействия t_c определяется от начала контакта частицы с подложкой до финальной деформации ϵ_f – со средней скоростью между V_{pi} и $V_p=0$.

- Эффективная деформация частиц ϵ возрастает линейно от $\epsilon=0$ до ϵ_f на протяжении всего времени взаимодействия t_c .

- Изменение свойств определенного материала во время деформации не учитывается.

- Область, которая претерпевает максимальный нагрев называется «ламелью» и обозначается δ . Средняя толщина «ламели» известна из литературы и равняется 1,2 мкм [16, 17].

С целью упрощения анализа в этом исследовании, частицы материала порошка принимаются идеально сферическими, а также обладающими физическими свойствами, как и при его исходном объемном состоянии [18].

Для определения температуры частицы при ее деформации используется закон сохранения энергии [6, 8, 9]. В данном исследовании рассматривались только напыленные частицы, в то время как каждый слой деформированных частиц рассматривается как подложка. Образование тепла при деформации частиц рассчитывается как разность между кинетической энергией частиц E_k и пластической энергией деформации E_p при помощи уравнения (1).

$$E_k - E_p = \Omega \cdot c_p (T_p - T_{pi}), \quad (1)$$

где Ω – объем частиц, c_p – теплоемкость материала, T_p – температура частицы при деформации, T_{pi} – температура соударения частицы.

Пластическая деформация частиц обычно изображается кривыми напряжения-деформации [5]. Так как площадь под кривыми напряжения-деформации рассматривает энергию, поглощенную материалом при деформации и затрату энергии при выполнении пластической работы, с помощью уравнения (2) можно определить энергию пластической деформации, где σ – эквивалентное напряжение текучести.

$$E_p = \Omega \int_0^{\epsilon} \sigma[\epsilon(t)] d\epsilon. \quad (2)$$

В данной модели деформации частиц после различных скоростей соударения при холодном напылении измеряется с использованием программы для анализа изображений [Imaje] [17]. Для измерения эффективного напряжения частиц, полученные покрытия характеризуются при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SELMIREM-106. Для подготовки образцов для металлографии использовался стандарт ASTM E3-01; образцы подвергались травлению в растворе соляной кислоты с целью лучшего выявления границ деформированных частиц. На рис. 1 представлен микрошлиф покрытия, полученного методом холодного напыления низкого давления из порошковой смеси N7-00-14 при начальной температуре $T_0=424$ °С, в котором желтым отмечены отдельные частицы никеля.

Морфология частиц большего размера больше выражена, так как они менее деформированы по сравнению с меньшими частицами, имеющих более вы-

тянутую геометрию. Среднее напряжение частиц для каждой порошковой смеси, напыленной при различных температурах торможения, рассчитывается принятием средней высоты и ширины и сравнением этих значений с величиной эллипсоида с аналогичными большим и меньшим радиусами.

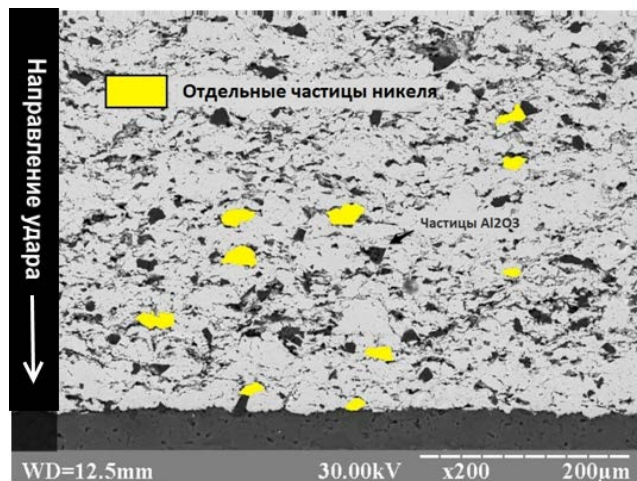


Рис. 1. СЭМ микрошлиф покрытия из порошковой смеси N7-00-14, полученного холодным напылением при начальной температуре $T_0=424$ °C

Конечное эквивалентное напряжение фон Мизеса для каждого образца рассчитывается при помощи следующего уравнения:

$$\varepsilon_f = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (3)$$

где значения деформации ε_1 и ε_2 получены в результате микрографических измерений ($n=100$) для сжимающих напряжений по вертикали и растягивающих по горизонтальной; значение ε_3 соответствует деформации в «глубине» координаты, находящейся за пределами видимости микрографии; это значение определяет рассматриваемое сохранение массы после определения ε_1 и ε_2 .

Округленное время контакта t_c рассчитывается разделив разность высоты недеформированной частицы и эффективного конечного напряжения частицы ε_f на среднее значение скорости между V_{pi} и $V_p=0$, как показано в уравнении (4).

$$t_c = \frac{2\varepsilon_f d_p}{V_p}. \quad (4)$$

Скорость деформации рассчитывается методом правосторонней разности, где i – число повторений:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{t_{i+1} - t_i}. \quad (5)$$

Предел текучести рассчитывается методом конечных разностей с использованием модели предела текучести Джонсона-Кука, при помощи которой можно определить накопление энергии в материале при деформации от пластической работы [5].

$$\sigma = \left[A + B(\dot{\varepsilon})^n \right] \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}) \right] \left[1 - \left(\frac{T_p - T_{pi}}{T_m - T_{pi}} \right)^m \right],$$

$$\sigma(t=0) = A, \quad (6)$$

где σ – предел текучести, A – начальное напряжение текучести, B – коэффициент деформационного упрочнения, m – коэффициент термопластичности. В табл. 1 представлены свойства никеля при расчете методом Джонсона-Кука [19, 20].

Таблица 1

Свойства никеля при расчете методом Джонсона-Кука

A (MPa)	163
B	648x106
C	0,006
n	0,33
m	1,44
T_m (K)	1756

Модель Джонсона-Кука при расчетах учитывает термопластичность материалов, в то время как температура T_{pv} полным объеме частиц рассчитывается при помощи уравнения (2). Для расчета температуры поверхности контактного взаимодействия между частицами, объем частиц Ω заменяется в уравнении (2) объемом Ω_{LH} , в котором локализуется нагрев, рассчитывается при помощи уравнения (7), где d_{splat} – диаметр деформированной частицы.

$$\Omega_{LH} = \frac{\pi d_{splat}^2 \delta}{4}. \quad (7)$$

С целью определения объема материала, который может быть расплавлен Ω_{melt} , температура частиц при конечном эффективном напряжении T_{pv} уравнении (1) заменяется температурой плавления материала T_m и решается для Ω_{melt} вместо Ω . Ω_{melt} сравнивается с объемом, в котором локализуется возникший нагрев Ω_{LH} и представляет объем материала в процентах, который может быть расплавлен по отношению к Ω_{LH} , как показано в уравнении (8).

$$\%ME = \frac{\Omega_{LH}}{\Omega_{melt}} \times 100. \quad (8)$$

5. Результаты исследований деформации частиц

В предыдущем разделе была представлена математическая модель, описывающая явление деформации частицы при холодном напылении. Модель решается методом конечных разностей; уравнения (2) решается в каждом последовательном приближении используя метод интегральной суммы Римана. Результаты предложенной модели представлены в табл. 2, включая входные параметры V_{pi} и T_{pi} для скорости и темпера-

туры соударения, полученных методом вычислительной гидродинамики.

Модель решается для размеров частиц в диапазоне одного среднеквадратического отклонения выше и ниже среднего размера частиц; этот метод рассматривает обеспечения максимального, среднего и минимального влияния модели для полного распределения частиц по размерам. Этот метод является причиной споров о действительных вероятностных характеристиках размера частиц, утверждающих, что по причине просеивания частиц они не могут показать нормального распределения; но в следствии того, что распределение частиц по размерам определялось при помощи приложения для анализа изображения ImageJ, авторы статьи могут рассматривать, что метод для этой модели подогнан для нормального распределения размеров частиц.

Таблица 2

Результаты расчетов параметров удара

T_0 (C)	d_p (μm)	c_p (J/kgK)	T_{pi} (K)	ε_f	T_{pbulk} (K)	$T_{pinterface}$ (K)	$\Omega_{LH} / \Omega_{melt}$	σ (Pa)
424	17	444	437,0	0,9	628	718	0,22	8,31E+08
424	25	444	406,8	0,9	682	967	0,41	8,28E+08
424	33	444	386,4	0,9	730	1272	0,65	8,26E+08
526	17	444	473,7	0,96	653	734	0,23	8,45E+08
526	25	444	436,1	0,96	713	993	0,43	8,42E+08
526	33	444	411,4	0,96	769	1311	0,68	8,40E+08
632	17	444	509,4	1,1	694	743	0,23	8,75E+08
632	25	444	464,6	1,1	764	1000	0,43	8,72E+08
632	33	444	435,1	1,1	829	1316	0,67	8,69E+08

При протекании процесса деформации частиц энергия, используемая для пластической работы, рассеивается в виде тепла. В данной работе было установлено, что материал подложки ни межфазная область между частицами ($\delta=1,2 \mu\text{m}$) не имеет признаков плавления. Однако, отношение $\Omega_{LH}/\Omega_{melt}$ предполагает, что меньшие значения оплавятся более интенсивнее и является предметом споров при холодном напылении низкого давления. Также необходимо отметить, что увеличение скорости частиц влияет на увеличение пластической деформации.

Как показано в предыдущем разделе, деформация частиц может быть изображена с использованием диаграммы напряжения-деформации, полученной с использованием модели напряжения текучести Джонсона-Кока (уравнение (6)). На рис. 2 изображены диаграммы напряжения-деформации частиц никеля при разных температурах торможения. Из полученных результатов можно отметить, что эффект термопластикации увеличивается с увеличением диаметра частиц. При увеличении скорости частиц увеличи-

вается конечное эффективное напряжение, так как максимальное значение предела текучести частиц увеличивается при поглощении материалом энергии во время удара.

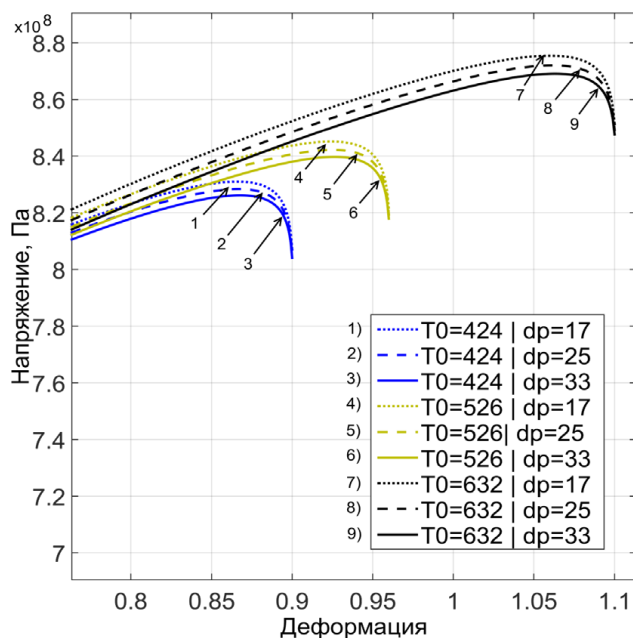


Рис. 2. Кривые напряжения-деформации никелевых частиц

6. Обсуждение результатов деформации частиц

По полученным результатам можно сделать вывод о увеличении пластической работы с увеличением температуры торможения. В большинстве случаев можно отметить, что затрачиваемая на выполнения пластической работы во время деформации частиц энергия выше, чем кинетическая энергия, переносимая одной частицей.

Это явление подразумевает, что частицы подвергаются обширному эффекту наклепа, в то время как многократные удары частиц способствуют деформации единичной частицы; в то время как керамические частицы не были деформированы при соударении по причине того, что они являются хрупким материалом; можно сделать вывод, что кинетическая энергия, переносимая керамическими частицами, способствуют деформации металлических частиц с определенными свойствами. На рис. 3 изображен график энергетического баланса между E_k и E_p для алюминиевых частиц при различных температурах торможения.

Необходимо отметить, что величина деформации рассматривается как эквивалентная величина не смотря на размер частиц. Влияние распределения частиц по размеру в исследованиях не учитывалось. Не смотря на то, что деформация частиц при соударении является усредненной, в расчетах учитывается вся энергия системы, показывающая влияние многократных соударений частиц на образование покрытия. Представленный в работе метод может быть применен для исследования любых покрытий, полученных холодным напылением, а также для понимания влияния параметров напыления на свойства покрытий.

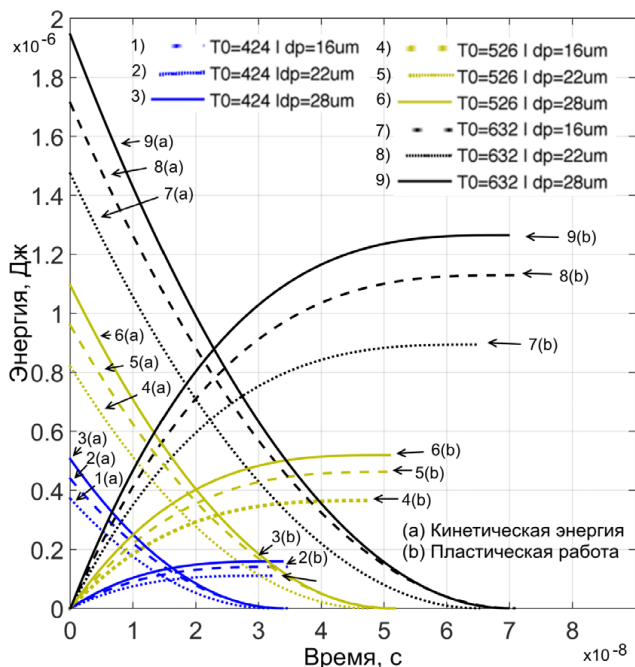


Рис. 3. График энергетического баланса E_k и E_p для частиц при различных начальных температурах

7. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Покрытия из никелевого порошка N7-00-14, полученного из Обнинского центра порошкового напыления (ОЦПН) были напылены на установке холодного напыления низкого давления ДИМЕТ 405 при разных рабочих температурах: 424 °C, 526 °C и 632 °C.

2. Для полученных покрытий был проведен анализ микроструктуры. Микрошлифы покрытий изготавливались согласно стандарту ASTM E3-01. Для анализа деформированных частиц была использована программа для анализа изображений и для каждого образца была определена величина деформации частиц для использования данных в предложенной математической модели.

3. Была разработана математическая модель для определения энергетического баланса при высокоскоростном деформировании в методе используются результаты металлографических исследований, а также скорость и температура при соударении. Для каждого изучаемого режима напыления определялись температура, динамический предел текучести и пластическая работа частиц при деформации. В работе показана высокая вероятность плавления материала частиц в процессе деформации, а также подтверждено обеспечение керамическими частицами достижение металлокерамической смеси достаточной пластической деформации для образования покрытия.

Литература

1. Maev, R. Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray [Text] / R. Maev, V. Leshchynsky. – Weinheim: Wiley-VCH, 2008. – 234 p. doi:10.1002/9783527621903
2. Davis, R. Handbook of Thermal Spray Technology [Text] / R. Davis. – ASM International and the Thermal Spray Society, 2004. – 338 p.

3. Assadi, H. Bonding mechanism in cold gas spraying [Text] / H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51, № 15. – P. 4379–4394. doi:10.1016/s1359-6454(03)00274-x
4. Li, W.-Y. On high velocity impact of micro-sized metallic particles in cold spraying [Text] / W.-Y. Li, H. Liao, C.-J. Li, G. Li, C. Coddet, X. Wang // Applied Surface Science. – 2006. – Vol. 253, № 5. – P. 2852–2862. doi:10.1016/j.apsusc.2006.05.126
5. Grujicic, M. 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, D. Helfritsch // Materials & Design. – 2004. – Vol. 25, № 8. – P. 681–688. doi:10.1016/j.matdes.2004.03.008
6. Wright, T. W. Shear band susceptibility: Work hardening materials [Text] / T. W. Wright // International Journal of Plasticity. – 1992. – Vol. 8, № 5. – P. 583–602. doi:10.1016/0749-6419(92)90032-8
7. Wright, T. W. Toward a defect invariant basis for susceptibility to adiabatic shear bands [Text] / T. W. Wright // Mechanics of Materials. – 1994. – Vol. 17, № 2-3. – P. 215–222. doi:10.1016/0167-6636(94)90061-2
8. Johnson, G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures [Text] / G. R. Johnson, W. H. Cook // In: Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics. – The Hague, The Netherlands, 1983. – Vol. 541, № 7. – P. 541–548. – Available at: \www/URL: http://www.lajss.org/HistoricalArticles/A%20constitutive%20model%20and%20data%20for%20metals.pdf
9. Schoenfeld, S. E. A failure criterion based on material instability [Text] / S. E. Schoenfeld, T. W. Wright // International Journal of Solids and Structures. – 2003. – Vol. 40, № 12. – P. 3021–3037. doi:10.1016/s0020-7683(03)00059-3
10. 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
11. Grujicic, M. Flow analysis and nozzle-shape optimization for the cold-gas dynamic-spray process [Text] / M. Grujicic, C. Tong, W. S. DeRosset, D. Helfritsch // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2003. – Vol. 217, № 11. – P. 1603–1613. doi:10.1243/095440503771909980
12. Koch, C. Structural nanocrystalline materials: fundamentals and applications [Text] / C. Koch, I. Ovid'ko, S. Seal, S. Veprek. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 364 p. doi:10.1017/cbo9780511618840
13. Jiji, L. Heat conduction [Text] / L. Jiji. – Ed. 3. – Berlin: Springer, 2009. – 418 p. doi:10.1007/978-3-642-01267-9
14. Jodoin, B. Effect of particle size, morphology, and hardness on cold gas dynamic sprayed aluminum alloy coatings [Text] / B. Jodoin, L. Ajdelsztajn, E. Sansoucy, A. Zúñiga, P. Richer, E. J. Lavernia // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201, № 6. – P. 3422–3429. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.07.232
15. Ning, X.-J. The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process [Text] / X.-J. Ning, J.-H. Jang, H.-J. Kim // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 253, № 18. – P. 7449–7455. doi:10.1016/j.apsusc.2007.03.031
16. Borchers, C. Microstructural bonding features of cold sprayed face centered cubic metals [Text] / C. Borchers, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 96, № 8. – P. 4288–4292. doi:10.1063/1.1789278
17. Dewar, M. P. Interfacial heating during low-pressure cold-gas dynamic spraying of aluminum coatings [Text] / M. P. Dewar, A. G. McDonald, A. P. Gerlich // Journal of Materials Science. – 2011. – Vol. 47, № 1. – P. 184–198. doi:10.1007/s10853-011-5786-z
18. Каналес, О. Вычислительное моделирование гидродинамики сопла холодного напыления низкого давления [Текст] / О. Каналес, А. А. Литвинов, С. Е. Маркович, А. И. Долматов // Механика та машинобудування. – 2014. – № 1. – С. 157–163.
19. MatWeb. Material properties data base [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: www.matweb.com
20. Boyer, H. Metals Handbook: Desk Edition [Text] / H. Boyer, T. Gall. – ASM International, 1985. – 1376 p.

ВИВЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЧАСТИНОК НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАННИХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ НИЗЬКОГО ТИСКУ

В роботі виконаний розрахунок параметрів деформації частинок нікелю при зіткненні з підкладкою при холодному газодинамічному напилюванні низького тиску. Представлений новий підхід розрахунку деформації частинок, що проводиться на основі результатів металографічних досліджень. Результати показали, що існує висока вірогідність плавлення частинок в зоні великих деформацій та наявності ефекту трамбування керамічними частками частинок металу при напилюванні металокерамічної порошкової суміші.

Ключові слова: холодне напилювання, деформація, динамічна межа текучості, покриття, аналіз мікроструктури.

Каналес Орасіо, аспірант, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Шорінов Олександр Володимирович, аспірант, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Волков Андрей Олегович, аспірант, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, e-mail: volkov_andrey_o@mail.ru.

Маркович Сергей Евгеньевич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Долматов Анатолий Иванович, доктор технічних наук, професор, кафедра технології виробництва авіаційних

них двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Каналес Орасіо, аспірант, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Шорінов Олександр Володимирович, аспірант, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Волков Андрей Олегович, аспірант, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Маркович Сергей Евгеньевич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Долматов Анатолий Иванович, доктор технічних наук, професор, кафедра технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Canales Horacio, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

Shorinov Oleksandr, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

Volkov Andrew, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: volkov_andrey_o@mail.ru.

Markovych Sergey, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

Dolmatov Anatoly, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

УДК 681.5.015:628.21

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.57120

**Дядюн С. В.,
Писаревский И. М.,
Штельма О. Н.**

ПОСТРОЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ КРУПНОГО ГОРОДА

В статье рассмотрена структура управления водопроводным хозяйством крупного города. Представлена структурная схема водопроводного хозяйства города, описывающая взаимосвязи между подсистемами и их функциональное назначение. Обращается внимание на основные трудности и проблемы, возникающие при построении автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) водоснабжения городов.

Ключевые слова: объект управления, система водоснабжения, функционирования, модель, критерий, качество, эффективность, автоматизированное управление.

1. Введение

Одной из важнейших проблем в системе коммунального хозяйства является проблема повышения качества и эффективности работы систем водоснабжения за счет имеющихся внутренних резервов этих систем.

Системы водоснабжения современных крупных городов характеризуются наличием огромного числа форми-

рующих их элементов: скважин, резервуаров, насосных станций, трубопроводов, задвижек, потребителей. Рост городов, развитие промышленности и строительства, ввод в эксплуатацию новых жилых массивов обусловили непрерывное увеличение и усложнение систем водоснабжения, вследствие чего традиционные методы управления этими системами перестали быть эффективными. Непрерывное развитие городских систем водо-