

## НАНЕСЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ НА ВНУТРЕННИЙ КОРПУС СОПЛОВОГО АППАРАТА

**Цель работы.** Определение влияния термической обработки теплозащитного покрытия на его стойкость и геометрические размеры деталей.

**Методы исследования.** Металлографические исследования поверхности упрочненных деталей, проведены геометрические обмеры, измерение адгезии.

**Полученные результаты.** Исследован процесс детонационного напыления порошковых металлических покрытий с использованием конденсированных высокоэнергетических материалов на базе разработанной установки. Суть детонационного напыления представлена как одна из разновидностей газотермического напыления промышленных покрытий, в основе которого лежит принцип нагрева напыляемого порошкового материала с последующим его ускорением и переносом на напыляемую деталь с помощью продуктов детонации. При детонационном напылении для нагрева и ускорения напыляемого материала использовалась энергия продуктов детонации газокислородного топлива. В качестве горючего газа применялась пропан-бутановая смесь. Благодаря высокой скорости напыляемых частиц (600—1000 м/с), детонационные покрытия обладают плотностью, близкой к плотности спечённого материала, и высокой адгезией. Детонационное напыление позволило напылять широкий круг материалов: металлы и их сплавы, оксиды, твёрдые сплавы на основе карбидов. При этом нагрев напыляемого изделия незначителен. Детонационное напыление из-за своего дискретного характера является очень экономичным, но не слишком производительным методом (по сравнению, например, с высокоскоростным газопламенным напылением). Благодаря высокой плотности и адгезии, получаемым детонационным способом, покрытия широко применяются в авиации, автомобильной и других областях машиностроения. Представлены результаты исследований полученных покрытий.

**Научная новизна.** Установлены закономерности термической обработки внутреннего корпуса соплового аппарата. Выявлено, что термическая обработка приводит к изменению структуры износостойкого покрытия, что увеличивает стойкость детали (количество термоциклов до образования трещин). Определено, что термическая обработка приводит к тому, что на покрытии не обнаружено трещин, сколов и вспучиваний.

**Практическая ценность.** В ходе работы была проведена серия постановочных экспериментов по определению влияния термообработки (ТО) теплозащитного покрытия ТЗП-2 на стойкость покрытия. Сравнительные исследования проводились на 2 корпусах внутренних сопловых аппаратов (СА). Выбран оптимальный режим термической обработки.

**Ключевые слова:** сопловой аппарат, нанесение покрытий, детонационный метод, уплотнительное покрытие, износостойкое покрытие, теплозащитное покрытие.

### Введение

В настоящее время широко применяются такие методы нанесения покрытий распылением, как металлизация, газопламенное и плазменное напыление [1, 2]. В силу того, что их свойства в некоторых случаях не удовлетворяют предъявляемым требованиям (из-за сравнительно низкой прочности сцепления таких покрытий с основой, в связи с чем ограничено их использование в машинах и механизмах, работающих при ударных нагрузках, а достигающая 10% пористость делает невоз-

можной их эксплуатацию в агрессивных средах [3–5]), то значительный интерес представляет детонационный метод нанесения покрытий [6]. Сущность детонационного напыления заключается в ускорении и одновременном нагреве напыляемых частиц с помощью взрыва с последующим контактом частиц порошка и уплотняемой детали [7]. В результате происходит устойчивое механическое сцепление подложки и наносимого материала [8], который в свою очередь мо-

жет изменять химические и механические свойства уплотняемой подложки [9–10].

#### Актуальность и цель работы

Имеется принципиальная возможность наносить покрытия [11] как различной толщины [12], так и различной химической структуры [13], в том числе и многослойные градиентные структуры [14]. К преимуществам этого метода [15, 16] относят высокую прочность сцепления ( $10 \dots 16 \text{ кг/мм}^2$ ) [17], высокую плотность (пористость менее 1 %) [18], возможность нанесения широкого класса материалов на подложки без изменения свойств материала основы [19]. Кроме того, из всех существующих только данный метод позволяет наносить металлокерамические твердые сплавы на основе карбидов вольфрама [20], хрома [21], титана [22]. При этом свойства покрытий практически не отличаются от свойств аналогичных твердых сплавов [23], полученных методами спекания [24]. Также к существенному преимуществу детонационного метода [25] относится лишь незначительный нагрев напыляемого изделия [26] по сравнению с другими методами (обычно  $d \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [27]. Высокие эксплуатационные свойства покрытий [28], получаемых методом детонационного напыления, позволяют радикально (в  $5 \dots 10$ , а в некоторых случаях в  $20 \dots 30$  раз) [29] повышать ресурс [30], износо- и коррозионную стойкость узлов и деталей [31].

#### Материалы и методика исследования

Корпус СА имеет три вида покрытий: уплотнительное покрытие 20Б – материал на основе никеля и меди (17–22 %) с добавлением графита (8–10 %), нитрида бора (18–20 %) и окиси кремния (4–8 %) (температура эксплуатации до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ), применяется в виде покрытия, наносимого плазменным и газоплазменным способом (порошки, стержни), износостойкое КХНП-15 (рабочая температура до  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и теплозащитное ТЗП-2 (рабочая температура до  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Поэтому для проведения работ по термообработке были взяты корпуса без нанесенного уплотнительного покрытия 20Б.

Сначала на корпуса СА и образцы-свидетели (для проведения исследований) было нанесено методом детонационного напыления износостойкое покрытие КХНП-15. Потом на корпуса внутренние СА и образцы (для проверки прочности сцепления) было нанесено покрытие ТЗП-2



Рис. 1. Внешний вид корпуса внутреннего СА с покрытием ТЗП-2 без ТО

(см. рис. 1) толщиной  $0,35 \dots 0,45 \text{ мм}$ , которое состоит из подслоя ПН70Ю30 ( $0,15 \dots 0,2 \text{ мм}$ ) и наружного слоя ПЦПК-63-Н30 ( $0,2 \dots 0,25 \text{ мм}$ ) и другие статорные детали. Покрытие ТЗП-2 в котором сколов, вспучиваний и трещин нет, соответствует требованию технологии. Согласно проведенным испытаниям, величина прочности сцепления на клеевых образцах составила  $6,2 \text{ кгс/мм}^2$ .

Корпус (№ 033А) и образец-свидетель с покрытием ПКХН-15, прошли термообработку по режиму: загрузка в печь при  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  – нагрев до  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  – выдержка 1 ч при  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  – нагрев до  $810 \text{ }^\circ\text{C}$  – выдержка 2 ч при  $810 \text{ }^\circ\text{C}$  – охлаждение в печи до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Время полного цикла термообработки (нагрев-остывание) составило 60 часов.

Далее исследования проводили с покрытием ТЗП-2.

После ТО покрытие ТЗП-2 на корпусе изменило цвет с серого на серо-зеленый (см. рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид покрытия ТЗП-2 после ТО

Также была проведена проверка прочности сцепления покрытия ТЗП-2 на клеевых образцах, прошедших ТО согласно технологии. Полученная средняя величина прочности сцепления ТЗП-2 составила  $5,3 \text{ кгс/мм}^2$ . Фото образцов с покрытием до и после ТО представлены на рис. 3.

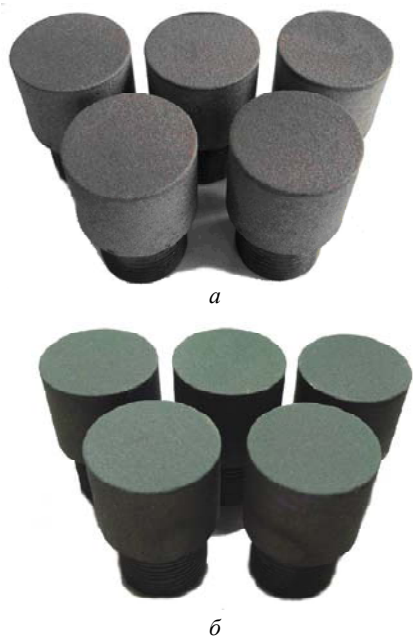
Далее после напыления покрытия ТЗП-2 и ТО корпуса (№ 033А) были проведены геометрические обмеры.

#### Теория и анализ полученных результатов

На образцах-свидетелях с покрытием ПКХН-15, прошедшем термообработку и не прошедшем ТО, были проведены сравнительные металлографические (см. рис. 4) и спектральные исследования. Покрытия идентичны, и термообработка на  $810 \text{ }^\circ\text{C}$  не приводит к изменению структуры износостойкого покрытия. Затем оба корпуса были направлены на термоциклирование по режиму: загрузка в печь при  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  – выдержка 20 мин. при  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  – охлаждение на воздухе до  $20 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$ . После 15 циклов термоциклирования на наружном корпусе, не прошедшем ТО (№ 003А), появилось 3 скола покрытия ТЗП-2 в районе верхнего сварного шва (см. рис. 5). После 20 циклов термоциклирования на этом же корпусе появилось еще один скол покрытия, а также краевые сколы

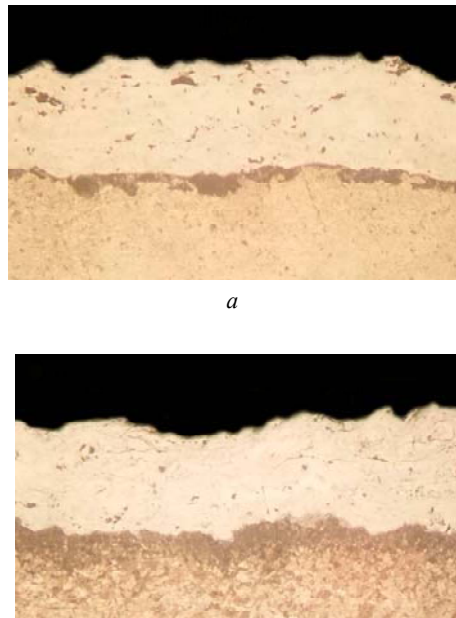
шириной до 2 мм (рис. 6).

После 35 циклов термоциклирования на этом же корпусе появились еще два скола покрытия, а предыдущие сколы увеличились в размерах вдоль сварных швов (рис. 7).



**Рис. 3.** Внешний вид клеевых образцов: *а* – образцы после напыления без ТО; *б* – образцы после напыления и ТО

После 50 циклов термоциклирования на корпусе, не прошедшем ТО (№ 003А), выявлено 8 сколов покрытия ТЗП-2 по верхнему сварному шву, 2 скола по вертикальному сварному шву, а также нижние краевые сколы (см. рис. 8).



**Рис. 4.** Шлифы покрытия ПКХН-15 ( $\times 200$ ): *а* – покрытие КХН-15 до ТО; *б* – покрытие КХН-15 после ТО 810 °С



**Рис. 5.** Скол покрытия ТЗП-2 после 15 циклов термоциклирования



**Рис. 6.** Скол покрытия ТЗП-2 после 20 циклов термоциклирования



Рис. 7. Сколы покрытия ТЗП-2 после 35 циклов термоциклирования



Рис. 8. Сколы покрытия ТЗП-2 после 50 циклов термоциклирования

В тоже время на корпусе (№ 033А), прошедшем ТО трещин, сколов и вспучиваний покрытия ТЗП-2 не обнаружено (см. рис. 9).

С помощью рентгенофлуоресцентного анализатора OLYMPUS Innov-X проверено и подтверждено соответствие материала корпуса внутреннего СА (ЭИ-868) и покрытия ТЗП-2 (ПН70Ю30, ПЦПК-63-Н-30), а также, что скол покрытия произошел по границе ПН70Ю30 и ПЦПК-63-Н-30.



Рис. 9. Внешний вид покрытия ТЗП-2 на корпусе (№ 033А), прошедший ТО после 50 циклов термоциклирования

#### Выводы

В данной статье показано, что проведенные опытные работы по термоциклированию показали, что тер-

мообработка корпуса внутреннего соплового аппарата снижает вероятность образования сколов покрытия.

#### Список литературы

1. Ткаченко С. Н. Поверхностное упрочнение деталей из высокоуглеродистых материалов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С. Н. Ткаченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2/5, (62), Харьков, 2013. – С. 30–34.
2. Ткаченко С. Н. Математическое моделирование скорости химической реакции для повышения эксплуатационных свойств деталей и инструмента сельскохозяйственного назначения методом СВЧ / С. Н. Ткаченко // Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки») // Випуск 59, Луцьк, 2017. – С. 269–277.
3. Shilin R. Materials for aerospace technique / R. Shilin // Aviation Materials on the border of XX and XXI centuries. VIAM. – 1994. – Vol. 2. – P. 49–63.
4. Tams R. D. Selection and use of Large diameter titanium pipe in a condeep offshore oil production platform / R. D. Tams // Proc. of the int. conf. on titanium prod. and appl. – 1990. – Vol. 1. – P. 368–393.
5. Titanium'2003 Science and Technology: prog. 10th World Conf. on Titanium, Saint-Petersburg, Russia 13-18 July 2003. – Hamburg, Germany. – Vol. 1–5. – 3425 p.
6. Titanium ' 2003: science and Technology: Proc. 10<sup>th</sup> World Conf. on titanium, 13–18 jul. 2003, Hamburg, Germany / edited by G Luetjering; J Albrecht– Weinheim: DGM:Wiley-

- VCH, 2004. – Vol. 1–5. – 3425 p.
7. Titanium '95: science and technology: proceedings of the eighth world conference on titanium, 22-26 Oct., 1995, Birmingham, UK / edited by P.A. Blenkinsop, W.J. Evans and H.M. Flower – London : Institute of Materials, 1996. – Vol. 3–25.
  8. Designing with titanium: proceedings of the eighth world conference on titanium, 7-9 July, 1986, University of Bristol, London / edited by P.A. Blenkinsop, W.J. Evans and H.M. Flower – London : Institute of Materials, 1986. – 305 p.
  9. Bania P.J./ Ti-1100 (Ti-1100, a High strength high temperature alloy) // Allow dig. – 1993. – Febr. – P. 5–6.
  10. Materials properties handbook. Titanium alloys / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. – ASM International. The Matirial Information Society, 1994. – 1176 p.
  11. The alloying of titanium by oxygen in the process of chamber electro-slag remelting / A.D. Ryabtsev, O.A. Troyanskyy, S.M. Ratiev [and other] // Proceeding of the 2011 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting «LMPC 2011». Nancy, France, September 18-21, 2011: LMPC, 2011– P. 39–42.
  12. Crossley F. A. Elevated temperature mechanical properties of transage 175 alloys (Ti-2.3Al-13V-7Sn-2Zr) / F. A. Crossley // SAMPE Quart. Covina Calif. – 1985. – Vol. 17. – № 3. – P. 5–12.
  13. Chao Y. J. Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 / Chao Y. J. and Qi X. // Journal of materials processing & manufacturing science. – 1998. – № 7(2). – P. 215–233.
  14. Frigaard O. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys. Metallurgical and Material Transactions / Frigaard, O., Grong, O. and Midling, O. T. // Physical Metallurgy and Materials Science. – 2001. – № 32(5). – P. 1189–1200.
  15. Tang W. Heat input and temperature distribution in friction stir welding / Tang W., Guo X., and McClure J. C. // Journal of materials processing & manufacturing science. – 1998. – № 7(2). – P. 163–172.
  16. Ryabtsev A. D. The refining and alloying of titanium in the process of chamber electro-slag remelting // Slags and fluxes in Modern metallurgy / A. D. Ryabtsev, B. Friedrich and A. Troyansky [eds.] / Proceeding of the International Workshop on Metal-Slag Interactions/ September 14 to 19 in Yalta, Crimea, Ukraine, Shaker Verlag, Aachen, 2011. – P. 175–188.
  17. Thomas W. M. Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies / W. M. Thomas, K. I. Johnson, C. S. Wiesner // Advanced engineering materials. – 5(7). – P. 485–490.
  18. Nalwa H. S. Nanostructured materials and tehnology / Nalwa H. S. – Esliver, 2001. – 864 p.
  19. Ajayan P. M. Nanocomposite science and technology / Ajayan P.M. – Wiley-VCN GmbH & Co, 2003. – 230 p.
  20. Kelsall R. Nanoscale science and technology / Kelsall R. – Wiley and Songs, 2005. – 475 p.
  21. Ivanishenko Yu. Deformation mehanisms in nanocrystalline palladium at large strains. / Yu. Ivanishenko, L. Kurmanaeva, J. Weissmueller // Acta materiala. – 2009. – № 57. – P. 3391–3401.
  22. Kolobov Yu.R. Grain boundary diffusion and plasticity/ superplasticity of polycrystalline and nanostructured metals and alloys / Yu.R. Kolobov, I.V. Ratochka // Materials Science and Engineering A. – 2005. – V. 410–411. – P. 468–471.
  23. Microstructures and mechanical properties of ultrafine-grained Ti foil processed by equal-channel pressing and cold rolling / Yu. Zhu, Yu.R. Kolobov, G.P. Grabovetskaya and etc. // J. Mater. Res. – 2003. – Vol. 18, N 4. – P. 1011–1016.
  24. Bulc nanostructured materials from severe plastic deformation / Valiev R.Z., Islamgaliev R.C., Alexandrov I.V. and etc. // Prog. Mater. Sci. – 2000. – № 45. – P. 103–189.
  25. Investigation and application of severe plastic deformation / Stolyarov V.V., Latysh V.V., Valiev R. Z. [et al.] // Kluwer Pulishers. NATO Scense Series. – 2000. – № 3. – P. 80–91.
  26. Mechanical properties of submicrocrystalline Ti-6Al-4V titanium alloy produced by severe plastic deformation / S. Zherebtsov, G. Salishev, R. Galeev [at al.] // Jornal of JSEM. – 2005. – № 3 (Vol. 5). – P. 92–96.
  27. Production of submicrocrystalline structure in lage-scale Ti-6Al-4V billet by warm severe deformation procession / S. Zherebtsov, G. Salishev, R. Galeev and etc. // Scripta Mater. – 2004. – № 51. – P. 1147–1151.
  28. Paton B. E. Welding in space and related tecnologies / B. E. Paton, V. F. Lapchinskii // E.O.Paton Electr. Weld. Inst. National Acad. of Sci. of the Ukraine. – Cambridge : Cambr. Intern. Sci. Publ., 1997. – 121p.
  29. Beygelzimer Y. Grain refinement versus voids accumulation during severe plastic deformations of polycrystals: mathematical simulation / Y. Beygelzimer // Machanics of Materials. – 2005. – № 37. – P. 753–767.
  30. Reinsch Wayne A. Terminology for titanium microstructure / Wayne A. Reinsch // Metal Progress. – 1982. – № 2. – P. 51–56.
  31. Vydehi Arun Joshi. Titanium alloys: an atlas of structures and fracture features / Vydehi Arun Joshi. – London : New York : Taylor & Francis Group, 2006. – 227 p.

Одержано 02.12.2019

**Ткаченко С. М., Єфанов В. С., Саприкін Є. В., Ждан В. О., Распорня Д. В. Нанесення порошкових покриттів детонаційним методом на корпус внутрішніх соплових апаратів**

**Мета роботи.** Визначення впливу термічної обробки теплозахисного покриття на його стійкість і геометричні розміри деталей.

**Методи дослідження.** Металографічні дослідження поверхні зміцнених деталей, проведені геометричні обміри, вимір адгезії.

**Отримані результати.** Досліджено процес детонаційного напилення порошкових металевих покриттів з використанням конденсованих високоенергетичних матеріалів на базі розробленої установки. Суть детонаційного напилення представлена як один із різновидів газотермічного напилення промислових

покриттів, в основі якого лежить принцип нагріву напилюваного порошкового матеріалу з подальшим його прискоренням і перенесенням на напилювану деталь за допомогою продуктів детонації. Під час детонаційного напилення для нагрівання і прискорення напилюваного матеріалу використовувалася енергія продуктів детонації газокисневого палива. Як горючий газ застосовувалася пропан-бутанова суміш. Завдяки високій швидкості напилюваних частинок (600–1000 м / с), детонаційні покриття мають щільність, близьку до щільності спеченого матеріалу, і високу адгезію. Детонаційне напилення дозволило напилювати широке коло матеріалів: метали та їх сплави, оксиди, тверді сплави на основі карбідів. При цьому нагрів напилюваного виробу незначний. Детонаційне напилення через свій дискретний характер є дуже економічним, але не дуже продуктивним методом (порівняно, наприклад, з високошвидкісним газополуменим напиленням). Завдяки високій щільності та адгезії, одержуваних детонаційними способом, покриття широко застосовуються в авіації, автомобільній та інших галузях машинобудування. Представлені результати досліджень отриманих покриттів.

**Наукова новизна.** Встановлено закономірності термічної обробки внутрішнього корпусу соплового апарату. Виявлено, що термічна обробка призводить до зміни структури зносостійкого покриття. Визначено, що термічна обробка призводить до того, що на покритті не виявлено тріщин, сколів і ступування.

**Практична цінність.** У процесі роботи була проведена серія постановочних експериментів щодо визначення впливу термообробки (ТО) теплозахисного покриття ТЗП-2 на стійкість покриття і геометричні розміри деталей. Порівняльні дослідження проводилися на 2 корпусах внутрішніх соплових апаратів (СА). Вибрано оптимальний режим термічної обробки.

**Ключові слова:** сопловий апарат, нанесення покриттів, детонаційний метод, покриття ущільнювача, зносостійке покриття, теплозахисне покриття.

**Tkachenko S., Yefanov V., Saprykin Y., Zhdan V., Raspornya D. Spraying of a powder coating on an inner body of a nozzle assembly using a detonation method**

**Objective.** Determining of heat treatment influence on a thermal blanket persistency and geometrical dimensions of its parts.

**Methods of research.** Metallographical surface evaluations of a work-hardened parts geometrical measurements, measuring the adhesion.

**Results.** The article details a detonation spraying of a metal powder coating using condensed high-energy materials based on engineered installation. Results of derived thermal blanket are featured.

**Scientific novelty.** Scientific novelty. Behavior patterns of inner body of a nozzle assembly was established. It was identified that heat processing leads to changes in metallurgical structure in an anti-abrasion coating. It was defined that heat processing results in no cracks, cleavages or swellings.

В ходе работы была проведена серия постановочных экспериментов по определению влияния термообработки (ТО) теплозащитного покрытия ТЗП-2 на стойкость покрытия. Сравнительные исследования проводились на 2 корпусах внутренних сопловых аппаратов (СА). Выбран оптимальный режим термической обработки.

**Practical value.** During work the series of raising experiments were conducted on determination of influence of heat treatment (HT) of heatcover coverage of HCC- 2 on firmness of coverage and geometrical sizes of details. Comparative researches were conducted on 2 corps of internal nozzle vehicles (NV). Optimal heat treatment conditions were established.

**Key words:** by a nozzle vehicle, overcoating, detonation method, compacting coverage, wearproof coverage, heatcover coverage.

---