

8. M.B. Leban, R. Tisu, The effect of TiN inclusions and deformation-induced martensite on the corrosion properties of AISI 321 stainless steel, *Eng. Fail. Anal.* 33 (2013) 430–438. doi:10.1016/j.engfailan.al.2013.06.021.
9. A. Pardo, M.C. Merino, A.E. Coy, F. Viejo, M. Carboneras, R. Arrabal, Influence of Ti, C and N concentration on the intergranular corrosion behaviour of AISI 316Ti and 321 stainless steels, *Acta Mater.* 55 (2007) 2239–2251. doi:10.1016/j.actamat.2006.11.021.
10. R.K.C. Nkhoma, C.W. Siyasiya, W.E. Stumpf, Hot workability of AISI 321 and AISI 304 austenitic stainless steels, *J. Alloys Compd.* 595 (2014) 103–112. doi:10.1016/j.jallcom.2014.01.157.
11. K.S. Min, S.W. Nam, Correlation between characteristics of grain boundary carbides and creep-fatigue properties in AISI 321 stainless steel, *J. Nucl. Mater.* 322 (2003) 91–97. doi:10.1016/S0022-3115(03)00274-5.
12. A.V. Filippov, S.Y. Tarasov, S.V. Fortuna, O.A. Podgornykh, N.N. Shamarin, V.E. Rubtsov, Microstructural, mechanical and acoustic emission-assisted wear characterization of equal channel angular pressed (ECAP) low stacking fault energy brass, *Tribol. Int.* 123 (2018) 273–285. doi:10.1016/j.triboint.2018.03.023.
13. D.V. Lychagin, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev, O.S. Novitskaia, Y.I. Chumlyakov, A.V. Kolubaev, Dry sliding of Hadfield steel single crystal oriented to deformation by slip and twinning: Deformation, wear, and acoustic emission characterization, *Tribol. Int.* 119 (2018) 1–18. doi:10.1016/j.triboint.2017.10.027.
14. A.V. Filippov, V.E. Rubtsov, S.Y. Tarasov, O.A. Podgornykh, N.N. Shamarin, Detecting transition to chatter mode in peakless tool turning by monitoring vibration and acoustic emission signals, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 95 (2018) 157–169. doi:10.1007/s00170-017-1188-y.
15. S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev, T.A. Kalashnikova, Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy, *Tribol. Int.* 115 (2017) 191–198. doi:10.1016/j.triboint.2017.05.039.
16. A.V. Filippov, A.Y. Nikonov, V.E. Rubtsov, A.I. Dmitriev, S.Y. Tarasov, Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling, *J. Mater. Process. Technol.* 246 (2017) 224–234. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030.
17. D.V. Lychagin, A.V. Filippov, O.S. Novitskaia, Y.I. Chumlyakov, E.A. Kolubaev, O.V. Sizova, Friction-induced slip band relief of Hadfield steel single crystal oriented for multiple slip deformation, *Wear.* 374–375 (2017) 5–14. doi:10.1016/j.wear.2016.12.028.
18. A.V. Filippov, V.E. Rubtsov, S.Y. Tarasov, Acoustic emission study of surface deterioration in tribocontacting, *Appl. Acoust.* 117 (2017) 106–112. doi:10.1016/j.apacoust.2016.11.007.
19. S. Atlati, A. Moufki, M. Nouari, B. Haddag, Interaction between the local tribological conditions at the tool-chip interface and the thermomechanical process in the primary shear zone when dry machining the aluminum alloy AA2024-T351, *Tribol. Int.* 105 (2017) 326–333. doi:10.1016/j.triboint.2016.10.006.
20. S. Bahi, G. List, G. Sutter, Modeling of friction along the tool-chip interface in Ti6Al4V alloy cutting, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 84 (2016) 1821–1839. doi:10.1007/s00170-015-7752-4.
21. T. Özel, The influence of friction models on finite element simulations of machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46 (2006) 518–530. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.07.001.
22. T. Özel, T. Altan, Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 40 (2000) 133–152. doi:10.1016/S0890-6955(99)00051-6.
23. S. Bahi, G. List, G. Sutter, Analysis of adhered contacts and boundary conditions of the secondary shear zone, *Wear.* 330–331 (2015) 608–617. doi:10.1016/j.wear.2015.01.016.
24. S. Atlati, B. Haddag, M. Nouari, A. Moufki, Effect of the local friction and contact nature on the Built-Up Edge formation process in machining ductile metals, *Tribol. Int.* 90 (2015) 217–227. doi:10.1016/j.triboint.2015.04.024.

### ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, НАПЫЛЕННЫХ СВС-МЕХАНОКОМПОЗИТАМИ

*А. В. Собачкин, к.т.н., с.н.с., В. И. Яковлев, к.т.н., доц., А. М. Бацук, магистрант  
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова  
656038, г. Барнаул, пр. Ленина 46, тел. 8 (3852) 29-08-15  
E-mail: anicpt@rambler.ru*

В работе проведено исследование износостойких свойств покрытий поршневых колец, напыленных с помощью газодетонационного метода. В качестве напыляемого порошка использовался СВС-механокомпозит состава TiC–NiCr. Установлено, что износ поршневых колец с разработанным покрытием на 27 % ниже, чем у аналогичных колец с гальваническим хромированием.

This paper focuses on the wear-resistant properties of coatings of piston rings sputtered with a gas detonation method. As a spraying powder a SHS-mechanical composite of the composition TiC–NiCr was

used. It is established that wear of the piston rings with the developed coating is 27% lower than in similar rings with galvanic chrome plating.

В настоящее время детали, узлы и агрегаты машин зачастую работают в экстремальных условиях под воздействием высоких нагрузок и значительных температур. В автомобиле в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации находятся поршневые кольца двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Использование технологий нанесения различных покрытий этих ответственных изделий является оправданным, поскольку позволяет увеличить эксплуатационную надежность машин и агрегатов, а также сэкономить ремонтные затраты [1]. Так, теплозащитные покрытия деталей цилиндра-поршневой группы ДВС обеспечивают снижение на 10–15 % потерь теплоты в охлаждающую жидкость, что приводит к повышению экономичности двигателя порядка 4 %. Расход топлива при этом снижается на 3–4 %, а общий моторесурс ДВС повышается на 20 %. Использование покрытий также позволяет снизить на 30 % рабочую температуру поршня в области первого кольца, что ведет к уменьшению износа кольца и практически полностью исключает вероятность заклинивания двигателя.

Поршневые кольца изготавливаются, как правило, из серого чугуна, однако в последнее время все большее внимание уделяется применению стальных поршневых колец. Наиболее широкое использование нашла сталь 65Г. По эксплуатационным показателям поршневые кольца из этой стали практически не уступают чугунным, но для увеличения износостойкости на кольца наносят защитные покрытия методами фосфатирования, сульфидирования, оксидирования; в последние годы используют также покрытия на основе карбидов и диборидов титана, циркония и др.

Однако отсутствие единых требований и технологических рекомендаций по созданию заданных параметров поверхностного слоя и восстановлению деталей требуют внедрения новых технологий нанесения покрытий [2]. Из существующих методов газотермического нанесения покрытий газодетонационный обладает рядом преимуществ, и может быть применен для упрочнения и восстановления деталей, работающих в условиях больших контактных нагрузок, ударного воздействия, эрозивного и абразивного износа [3–6].

Дальнейшее развитие метода газодетонационного напыления (ДГН), наряду с модернизацией оборудования, состоит в совершенствовании технологии, например, путем использования новых материалов [7, 8]. С этой целью в процессах газодетонационного напыления могут применяться композиционные порошковые смеси, подверженные предварительной механической активации. Получение новых материалов, кроме этого, также возможно с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [9, 10]. Объединение технологий СВС, ДГН и механоактивации в единый технологический цикл может иметь хорошие перспективы для развития нанотехнологий [11–13].

В данной работе исследовали покрытия на основе наноструктурных материалов, полученных методами механохимии с проведением реакции высокотемпературного синтеза в металлической матрице, и нанесенные газодетонационным способом.

Объекты и методы

Для газодетонационного напыления использовалась установка «Катунь-М» (рисунок 1). Она предназначена для напыления покрытий на основе порошковых материалов на различные детали для обеспечения принципиально других свойств в сравнении с исходным изделием [14, 15]. Установка расположена в изолированном помещении с принудительной вентиляцией.

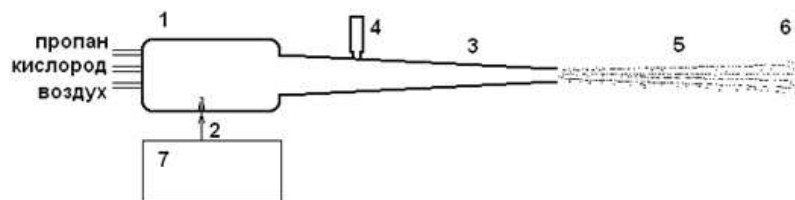


Рис. 1. Схема установки газодетонационного напыления «Катунь-М»:  
1 – форкамера, 2 – система зажигания, 3 – ствол, 4 – дозатор порошка, 5 – поток напыляемых частиц, 6 – напыляемая деталь, 7 – блок управления.

Установка газодетонационного напыления «Катунь-М» включает в себя: блок напыления, который, в свою очередь, состоит из форкамеры 1 и ствола 3; систему зажигания 2; порошковый доза-

тор 4 и блок 7 управления установкой. В состав блока управления входит газораспределительная станция, система охлаждения блока напыления и устройство перемещения установки.

Определение трибологических характеристик поршневых колец проводили на машине 2168 УМТ для испытания материалов на трение (рисунок 2). Триботехнический комплекс позволяет проводить испытания материалов на трение и износ в широком диапазоне нагрузок, скоростей и схем испытаний [16]. При этом, машина позволяет одновременно испытывать исследуемый и эталонный образец при их постоянном перемещении по спирали Архимеда.

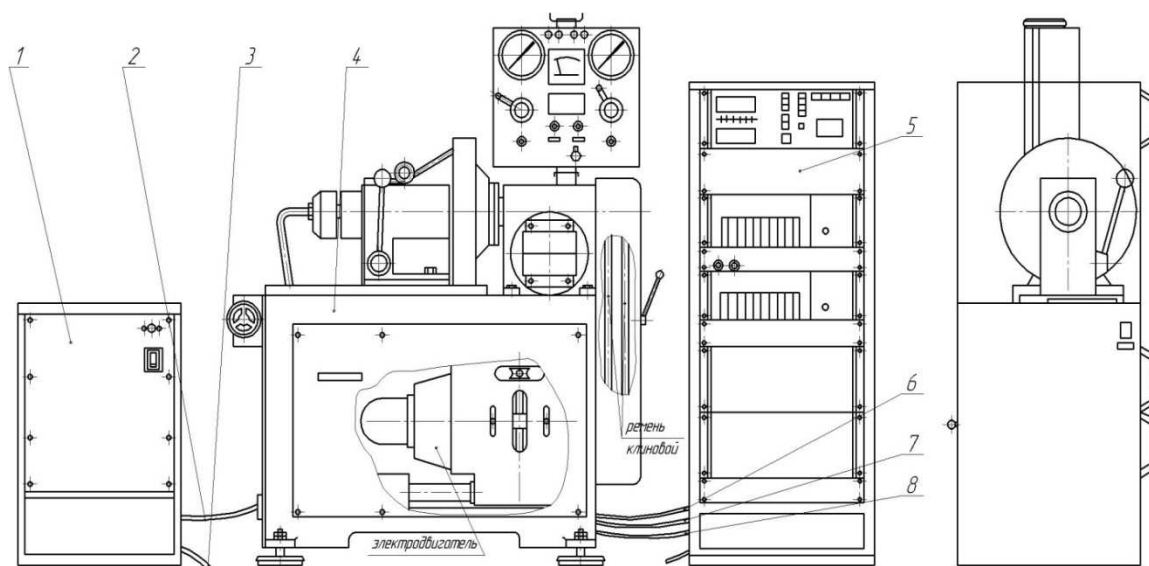


Рис. 2. Триботехнический комплекс 2168 УМТ:

1 – силовой пульт; 2, 3, 6, 7, 8 – соединительные устройства; 4 – испытательная установка; 5 – пульт управления

Определение износостойкости напыленных покрытий проводилось по ГОСТ 23.204-78. Обеспечение износостойкости изделий. Методы определения истирающей способности поверхностей при трении.

Исследования сравнительной износостойкости выполнялись в условиях сухого трения по схеме «диск – палец». Диск изготовлен из чугуна, соответствующего по химическому составу и термической обработке гильзе дизельного двигателя. Дыску сообщается вращательное движение, а образцу («пальцу») – радиальное возвратно-поступательное перемещение, обеспечивающее примерно равномерное изнашивание диска. Усиление прижима образца к диску регулируется до обеспечения удельного давления, идентичного расчетному давлению кольца на гильзу от его собственной упругости.

Продолжительность испытаний каждого образца составляла 14 часов (исходя из имеющегося опыта подобных исследований) [17].

Для оценки износостойкости покрытий применялся весовой метод. Суть метода состоит в оценке износа через взвешивание образцов до и после изнашивания. Контроль износа образцов производился через каждый час. Перед взвешиванием образец промывался для удаления продуктов износа, сушился. Взвешивание производилось на аттестованных аналитических весах с точностью измерений 0,1 мг.

Испытанию подвергалось по 3 образца, вырезанных из разных поршневых колец одного вида. По результатам измерений рассчитывался средний весовой износ для трех образцов по 14 контрольным точкам.

Для проведения исследований использовались следующие образцы и абразивы: чугунные маслосъемные кольца с хромированным покрытием, произведенные на ставропольском заводе поршневых колец; кольца из стали 65Г в исходном состоянии с покрытием, и обработанные методом ионной имплантации; чугунные диски без обработки; закаленные чугунные диски; диски из стали 65Г с закалкой, а также диск из фосфористого чугуна.

Как уже отмечалось, порошки монокарбида титана имеют широкое применение в различных отраслях машиностроения [18, 19]. В этой связи по разработанной технологии были получены СВС-материалы, предназначенные для использования в качестве напыляемого порошка. Используя УДГН «Катунь-М», было проведено нанесение покрытий на основе TiC + NiCr на образцы поршневых колец, изготовленных из стали 65Г.

Кроме того, испытанию подвергались образцы, полученные из колец разных изготовителей с различными видами поверхностного упрочнения. Таким образом, оценка износостойкости проводилась для следующих поршневых колец:

- кольца, изготовленные из стали 65Г с детонационно-газовым напылением покрытия из СВС-механокомпозита состава TiC + NiCr;
- кольца, изготовленные из стали 65Г с гальваническим хромированием;
- кольца, изготовленные из стали 50ХФА с оксикарбонитрацией (ОКН) поверхностного слоя (~ 200 мкм);
- кольца производства Чехии;
- кольца производства Ставропольского завода поршневых колец (чугунные с гальваническим хромированием).

Рассчитанные средние значения весового износа образцов из разных колец сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Весовой износ образцов

Образец(кольцо)	Весовой износ (мг) при различном времени испытания (час)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
65Г+(TiC+NiCr)	0,5	0,7	1,0	1,5	1,7	1,9	2,1	2,4	2,8	3,1	3,6	4,0	4,2	4,4
65Г+ Cr	0,7	0,9	1,3	1,7	2,2	2,5	3,1	3,5	3,9	4,1	4,5	5,2	5,7	6,0
50ХФА+ОКН	1,3	1,7	1,9	2,1	2,3	2,8	2,9	3,2	3,5	3,7	4,0	4,5	5,0	5,2
Чехия	0,8	1,4	2,2	2,5	3,0	3,7	4,0	4,3	4,7	5,3	5,9	6,0	6,5	7,2
Ставрополь	1,7	2,2	2,5	2,8	4,0	4,5	5,2	5,7	6,2	6,9	7,7	8,2	8,6	9,2

По полученным данным построены графики износа образцов, представленные на рисунке 3.

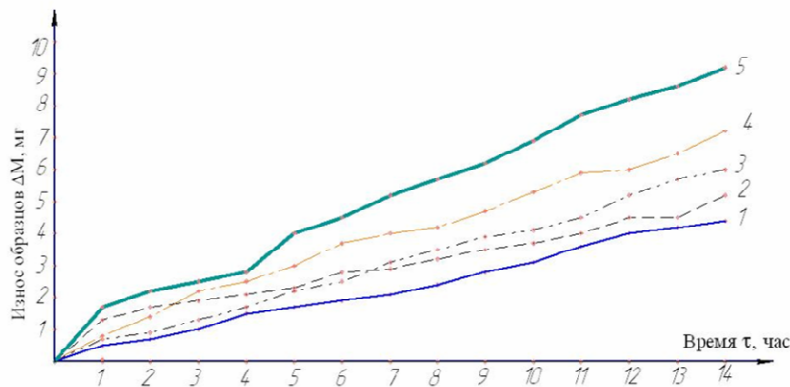


Рис. 3. Износ образцов из колец с различными видами поверхностного упрочнения: 1 – детонационное напыление TiC + CrNi; 2 – оксикарбонитрация; 3 – гальваническое покрытие; 4 – кольцо производства Чехии; 5 – кольцо Ставропольского завода

В начальный период наблюдается повышенная интенсивность износа, что обусловлено начальной приработкой и соответствует общей теории износа. Наиболее заметен процесс приработки на образцах из 50ХФА с оксикарбонитрацией вследствие наличия слоя мягких окислов, облегчающих процесс приработки реального кольца к гильзе.

По истечении периода приработки (от 1 до 5 часов) интенсивность износа стабилизируется, и зависимость износа от времени становится близкой к линейной (период нормального износа).

В результате проведенных исследований установлено, что наилучшей износостойкостью обладают образцы из колец, напыленных СВС-материалами на основе карбида титана газодетонационным способом (кривая 1, рисунок 3). Величина общего износа за весь период испытаний на 16 % ниже, чем у колец, подвергаемых оксикарбонитрации (кривая 2), и на 27 % ниже, чем у аналогичных колец с гальваническим хромированием (кривая 3). Таким образом, использование технологии СВ-синтеза в механоактивированных системах Ti–C–NiCr и последующее газодетонационное напыление этих составов позволяет получать покрытия на прецизионные детали машиностроения, которые могут заменить гальваническое хромирование.

Список литературы

1. Гаркунов Д.Н., Балабанов В.И. Восстановление двигателей внутреннего сгорания без их разборки // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 18–22.
2. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника, 1986. С. 233.
3. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л. : Машиностроение, 1982. С. 215.
4. Особенности структурного состояния механокомпозитов на основе алюминия для газодетонационного напыления покрытий / А. А. Ситников, А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, М. В. Логинова, А. П. Свиридов // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2017. – № 12 (78). – С. 20–25.
5. Robert V.H. Plasma-Spray Coating. Principles and Applications. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: VCH. 1996. 339 p.
6. Андреев А.А., Картамазов Г.Н., Кунченко В.В. Покрытия для поршневых колец // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 9.
7. The evolution of structural and phase states of titanium aluminides after gamma irradiation in small doses / M. V. Loginova, V. I. Yakovlev, A. A. Sitnikov, A. V. Sobachkin, S. G. Ivanov, A. Z. Negodyaev, A. V. Gradoboev // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – Vol. 118. – № 2. – P. 170–175.
8. Морфология и структурные характеристики порошковых механокомпозитов Ti+Al после облучения / М. В. Логинова, В. И. Яковлев, В. Ю. Филимонов, А. А. Ситников, А. В. Собачкин, С. Г. Иванов, А. В. Градобоев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14. – № 4. – С. 464–469.
9. Корчагин М.А., Григорьева Т.Ф., Бохонов Б.Б., Баринаева А.П., Ляхов Н.З. Механическая активация и самораспространяющийся высокотемпературный синтез при получении монофазных высокодисперсных интерметаллидов // Вопросы материаловедения. 2002. № 1. С. 419–423.
10. Fu Z.Y., Wang H., Wang W.M., Yuan R.Z. Composites fabricated by self-propagating high-temperature synthesis // J. Mater. Proc. Tech. 2003. V. 137. P. 30–34.
11. Собачкин А.В., Попова А.А., Назаров И.В. Структура и свойства газодетонационных покрытий различного функционального назначения на основе порошковых слоистых механокомпозитов с металлической и интерметаллидной матрицей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 6 (102). С. 16–22.
12. Leong C.C., Lu L., H.Fuh J.Y., Wong Y.S. In-situ formation of copper matrix composites by laser sintering // Mater. Sci. Eng. A. 2002. Vol. 338. P. 81–88.
13. Tu J.P., Wang N.Y., Yang Y.Z., Qi W.X., Liu F., Zhang X.B., Lu H.M., Liu M.S. Preparation and properties of TiB<sub>2</sub> nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing // Mater. Lett. 2002. V. 52. P. 448–452.
14. Яковлев В.И., Шабалин В.Н., Собачкин А.В. Детонационное напыление покрытий из базальта // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств : сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции. Барнаул, 2009. С. 237–242.
15. Собачкин А.В., Яковлев В.И., Ситников А.А., Логинова М.В., Иванов С.Г., Свиридов А.П. Особенности формирования покрытий из алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала при газодетонационном напылении // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 4. С. 444–449.
16. Собачкин А.В., Свиридов А.П., Яковлев В.И., Ситников А.А., Радионов Р.В. Антифрикционные газодетонационные покрытия поршня двигателя внутреннего сгорания на основе наноструктурированного композиционного материала // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3. № 2. С. 67–73.
17. Собачкин А.В., Ситников А.А., Свиридов А.П. Оценка износостойкости изделий на основе механоактивированных материалов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. 2014. С. 248–251.
18. Kermedy A.R., Karantzalis A.E., Wyatt S.M. The microstructure and mechanical properties of TiC and TiB<sub>2</sub>-reinforced cast metal matrix composites // J. Mater. Sci. 1995. V. 34. P. 933–940.
19. Гаркунов Д.Н., Балабанов В.И. Восстановление двигателей внутреннего сгорания без их разборки // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 18–22.