

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

*А.Г. СОКОЛОВ, доктор техн. наук, профессор
Э.Э. БОБЫЛЁВ, аспирант
(КубГТУ, г. Краснодар)*

Поступила 17 декабря 2014
Рецензирование 12 января 2015
Принята к печати 29 января 2015

Соколов А.Г. – 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
Кубанский государственный технологический университет,
e-mail: Sag-51@bk.ru

Приведен анализ причин выхода из строя чугунных изделий. Рассмотрены причины снижения износостойкости изделий из чугунов. Приведены результаты исследований процесса диффузионного титанирования чугунов из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Описана технология, обеспечивающая формирование на чугунах качественных работоспособных износостойких титановых покрытий. Толщина покрытия, формируемого за два часа, составила более 30 мкм. Микротвердость покрытия составила 25 000 МПа, микротвердость основы 4000 МПа. При этом в отличие от титанирования, проводимого без обезуглероживания, под покрытием образуется переходной слой пониженной твердости. Твердость этого переходного слоя составляет 3200 МПа. Исследовано влияние диффузионного титанирования на износостойкость чугунных изделий; микроструктура и состав полученных диффузионных титановых покрытий; трибологические свойства титановых покрытий, а также трибологические свойства пар трения. Оптимальной парой трения с точки зрения трибологических свойств является пара трения, в которой неподвижная деталь имеет покрытие. В этом случае линейный износ покрытой детали с титановым покрытием равен нулю, а непокрытый образец изнашивается на 0,02 мм.

Ключевые слова: диффузионные титановые покрытия, чугунные изделия, свойства покрытий, обезуглероживание, повышение износостойкости, трибологические свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-60-68

Введение

Чугун является весьма распространенным конструкционным материалом, из которого изготавливается большое количество корпусных изделий. Он применяется в узлах, где присутствует трение скольжения. Такая распространенность чугунов обусловлена экономическими, технологическими и в ряде случаев их эксплуатационными свойствами. Чугуны значительно дешевле сталей, они обладают высокими литейными свойствами, а также им присущи антифрикционные свойства, которые связаны с наличием в них графитовых включений [1]. Однако работоспособность чугунов в парах трения

значительно ограничена действующими в них нагрузками и скоростями. При повышении нагрузок и скорости движения деталей в парах трения износостойкость чугунного элемента в них резко снижается. Снижению износостойкости также способствует коррозионное воздействие рабочей среды, которое наиболее интенсивно проявляется при возникновении сухого трения. Так как износостойкость изделий определяется свойствами их поверхностных слоев, то стойкость к износу чугунных изделий (особенно в присутствии агрессивного воздействия рабочей среды) может быть повышена путем нанесения на их поверхность покрытий, обеспечивающих высокую твердость и коррозионную стойкость

поверхностных слоев изделий [2–3]. Такими покрытиями являются диффузионные титановые покрытия.

Известно несколько способов получения титановых покрытий на чугунах [4–9]. Однако все эти способы обладают следующими недостатками: применение специального оборудования; использование дорогого порошкообразного титана; использование хлоридов или фторидов титана; большая длительность процесса; малая толщина покрытия; высокие потери диффузанта и др. Указанных недостатков лишена технология диффузионного легирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Однако процесс нанесения диффузионных титановых покрытий на чугуны имеет проблематичный характер, что обусловлено формированием на них очень хрупких, состоящих из карбида титана покрытий [10], которые скалываются с поверхности чугуна даже при его охлаждении после процесса титанирования (рис. 1).

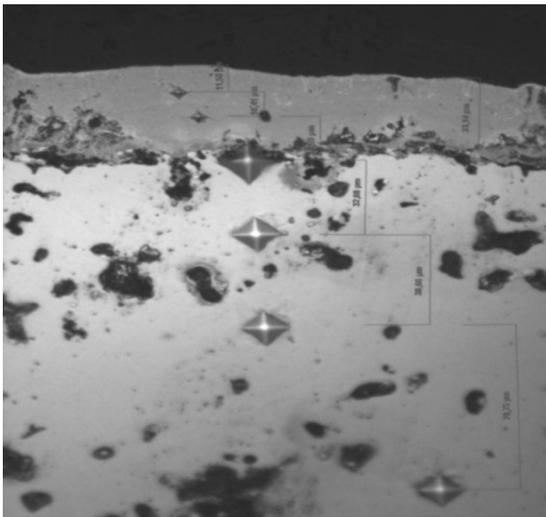


Рис. 1. Микроструктура титанового покрытия, полученного на чугунах СЧ 26, после предварительного обезуглероживания его поверхности

Для обеспечения возможности формирования на чугунах качественных работоспособных покрытий, обеспечивающих повышение износостойкости и коррозионной стойкости, нами разработана и запатентована технология [11], включающая проведение перед процессом нанесения титановых покрытий обезуглероживающего отжига поверхностных слоев чугунных изделий. Проведение обезуглероживающего от-

жига приводит к снижению концентрации углерода в поверхностных слоях чугунных изделий до 1...1,5 %, т. е. на поверхности чугунов формируется слой стали. При таком содержании углерода, используя соответствующие режимы диффузионной металлизации, можно получать двухфазные покрытия, состоящие из карбида титана с твердорастворной связкой на базе α -Ti, которые не обладают хрупкостью и имеют высокую износостойкость и коррозионную стойкость [12–14]. Таким образом, процесс диффузионного титанирования чугунов состоит из двух стадий: 1-й стадии – отжиг чугунных изделий в окислительной среде и 2-й стадии – диффузионной металлизации (диффузионного титанирования).

Целью исследований, описываемых в данной статье, является оценка влияния диффузионного титанирования чугунных изделий, в частности, гильз и колец цилиндропоршневых групп двигателей внутреннего сгорания на их износ, а также анализ трибологических свойств данных пар трения.

Методика исследования

В качестве исследуемого материала выбран чугун СЧ26, используемый для изготовления гильзы двигателя ЗМЗ-406. Исследование влияния диффузионного титанирования на износостойкость чугунных изделий и на трибологические свойства пар трения «чугун по чугуну», «чугун по чугуну с титановым покрытием» и «чугун с титановым покрытием по чугуну с титановым покрытием» проводились на машине трения СМЦ-2 с применением образцов типа «колодка – ролик».

Процесс диффузионного титанирования образцов осуществляется по рассмотренной ранее технологии [11] в две стадии. На первой стадии образцы подвергаются отжигу в кислородсодержащей среде длительностью от 3 до 10 часов при температуре 800...950 °С, а на второй – диффузионному титанированию в легкоплавком расплаве, содержащем свинец-висмут-литий-титан [10]. Температура процесса титанирования варьировалась от 1000 до 1120 °С. Благодаря введению в технологический процесс стадии предварительного отжига чугунных изделий в кислородсодержащей среде происходит снижение концентрации углерода в поверхностных

слоях изделий, вследствие этого при последующей металлизации (насыщении) на изделии формируется покрытие, которое помимо карбида содержит и твердорастворную связку. Такие покрытия обладают высокой износостойкостью и в то же время достаточной вязкостью, исключая скалывание, растрескивание и разрушение покрытий от внешнего механического воздействия. Таким образом, обеспечивается возможность формирования на поверхности чугунных изделий качественных, работоспособных покрытий, обеспечивающих повышение их износостойкости.

Микроструктура (без травления) титанового покрытия, полученного по предлагаемой нами технологии, включающей стадию предварительного обезуглероживания поверхностных слоев чугуна путем окислительного отжига, представлена на рис. 1. Анализ микроструктуры и распределения микротвердости по покрытию, переходной зоне и основе показывает (рис. 2), что обезуглероживание поверхностных слоев чугуна перед титанированием обеспечивает формирование на его поверхности равномерного бездефектного покрытия значительной для данного типа покрытий толщиной более 30 мкм за два часа.

Микротвердость покрытия составила $H_{50} = 25\ 000$ МПа, микротвердость основы 4000 МПа. При этом в отличие от титанирования, проводимого без обезуглероживания, под покрытием

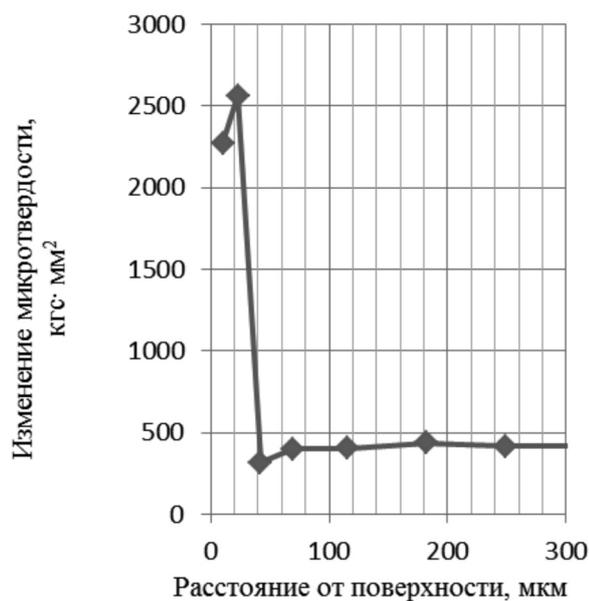


Рис. 2. Микротвердость покрытия и приповерхностной зоны при нагрузке 50 граммов, х500

образуется переходной слой пониженной твердости. Твердость этого переходного слоя составляет $H_{50} = 3200$ МПа.

Как следует из анализа микроструктуры чугуна, представленного на рис. 3, за счет предварительного отжига под покрытием формируется достаточно протяженный обезуглерожженный слой толщиной порядка 600 мкм, в котором отсутствует пластинчатый графит.

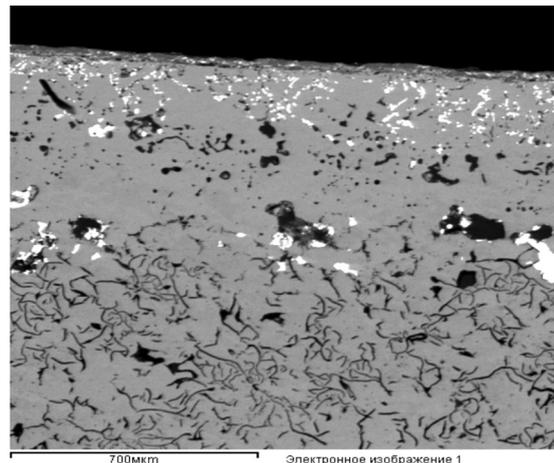


Рис. 3. Микроструктура титанового покрытия, обезуглерожженного слоя и основы. Чугун СЧ 26, титанирование после предварительного обезуглероживания его поверхности

Качество и свойства получаемых покрытий, кроме химического состава чугуна и толщины изделия, при использовании предлагаемой технологии зависят от длительности процесса предварительного отжига и его температуры.

Исследования влияния параметров и состава титановых покрытий на трибологические свойства покрытых чугунных изделий проводились путем проведения сравнительных испытаний на образцах типа «колодка – ролик», изготовленных из чугуна марки СЧ 26 установленных геометрических размеров. При этом исследовались трибологические свойства образцов без покрытий и с титановыми покрытиями при различном сочетании пар трения – колодка и ролик без покрытия; колодка и ролик с титановым покрытием; колодка с титановым покрытием и ролик без покрытия; колодка без покрытия и ролик с титановым покрытием. Покрытия наносились из расплава свинец-висмут-литий-титан по ранее оптимизированному режиму. Образцы перед нанесением покрытий были подвергну-

ты обезуглероживающему отжигу. В результате титанирования на поверхности образцов образовывались покрытия на базе карбида титана с α -титановой связкой.

При испытаниях в качестве смазки использовалось индустриальное масло И20А. В ходе испытаний измерялась температура в зоне трения, а также коэффициент трения. Также измерялась шероховатость поверхности до и после испытаний.

Результаты и обсуждение

Анализ результатов проведенных испытаний показывает, что титановые покрытия, нанесенные на чугун, обеспечивают чугунным деталям высокую износостойкость. Как показали проведенные исследования, при одинаковых условиях испытаний линейный износ деталей с титановыми покрытиями равен нулю. В то же время на образцах без покрытия наблюдался интенсивный износ.

При этом необходимо отметить, что трибологические свойства пар трения в значительной степени зависят от их сочетания. В парах трения, состоящих из деталей с покрытием и без покрытия, их износ и трибологические свойства зависят от наличия покрытия на подвижной или неподвижной деталях (рис. 4–8).

Оптимальной парой трения с точки зрения трибологических свойств является пара трения, в которой неподвижная деталь имеет покрытие. В этом случае линейный износ покрытой детали

с титановым покрытием равен нулю, а непокрытый образец изнашивается на 0,02 мм. В такой паре трения присутствует период приработки, который приводит к снижению коэффициента трения до уровня 0,015, после чего наступает период стабильной работы. О наличии стабилизации процессов в паре трения свидетельствует и стабилизация прироста температуры смазывающей среды. О наличии процесса приработки и стабилизации процесса износа на участке безыносности [15] говорят и характеристики шероховатости трущихся поверхностей.

В паре трения, в которой титановое покрытие нанесено на подвижную деталь, а неподвижная деталь не покрыта, наблюдается более интенсивный износ непокрытой детали. Так, если линейный износ подвижной детали с титановым покрытием составил ноль миллиметров, то линейный износ непокрытой неподвижной детали за период испытаний составил 0,76 мм.

В такой паре трения коэффициент трения значительно выше. После периода приработки коэффициент трения равен 0,027, т. е. в 1,8 раза больше, чем в паре трения, в которой неподвижная деталь имеет покрытие.

Кроме повышения линейного износа непокрытой детали и коэффициента трения в паре покрытая подвижная деталь – непокрытая неподвижная после приработки пары трения практически отсутствует период стабильной безыносной работы, о чем свидетельствует анализ зависимости прироста температуры от времени испытания.

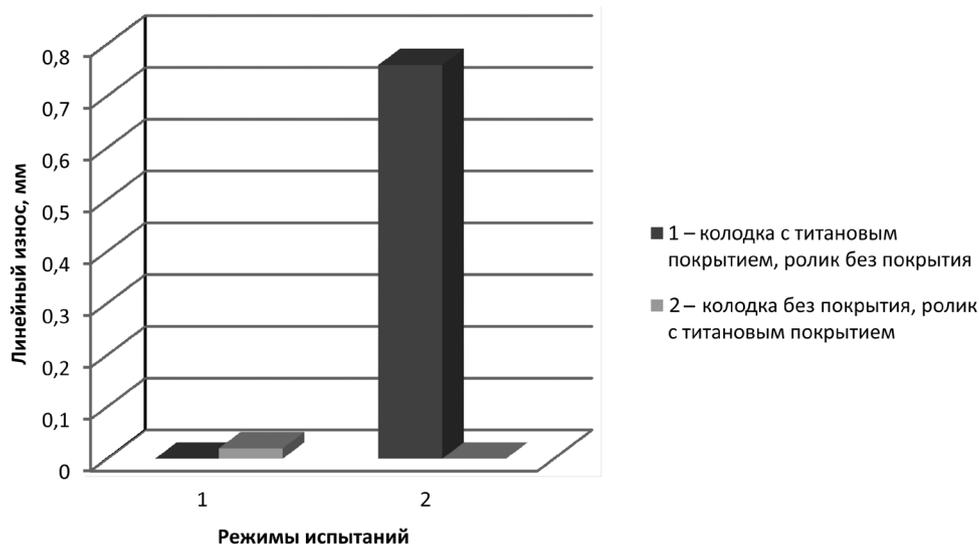


Рис. 4. Влияние титановых покрытий на износостойкость чугуна

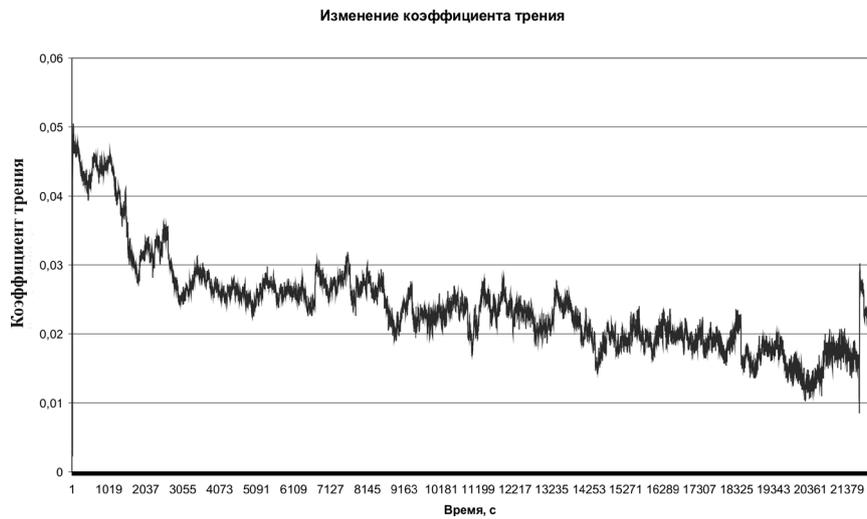


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от времени испытания Колодка с титановым покрытием, ролик без покрытия

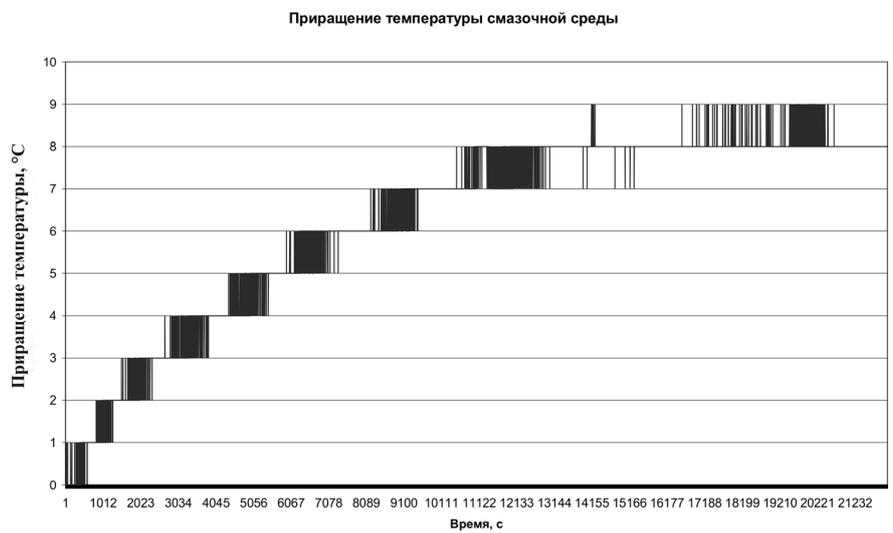


Рис. 6. Зависимость приращения температуры смазочной среды от времени. Колодка с титановым покрытием, ролик без покрытия

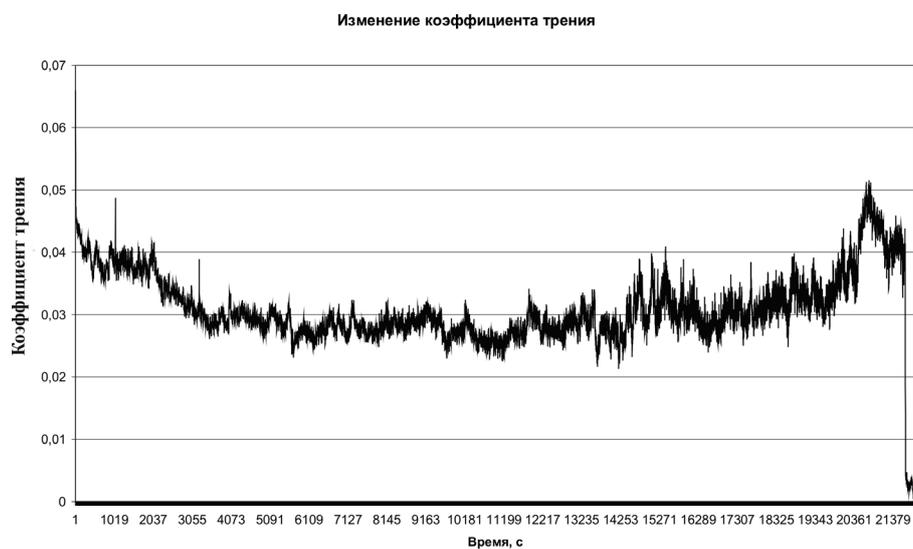


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от времени испытания Колодка без покрытия, ролик с титановым покрытием

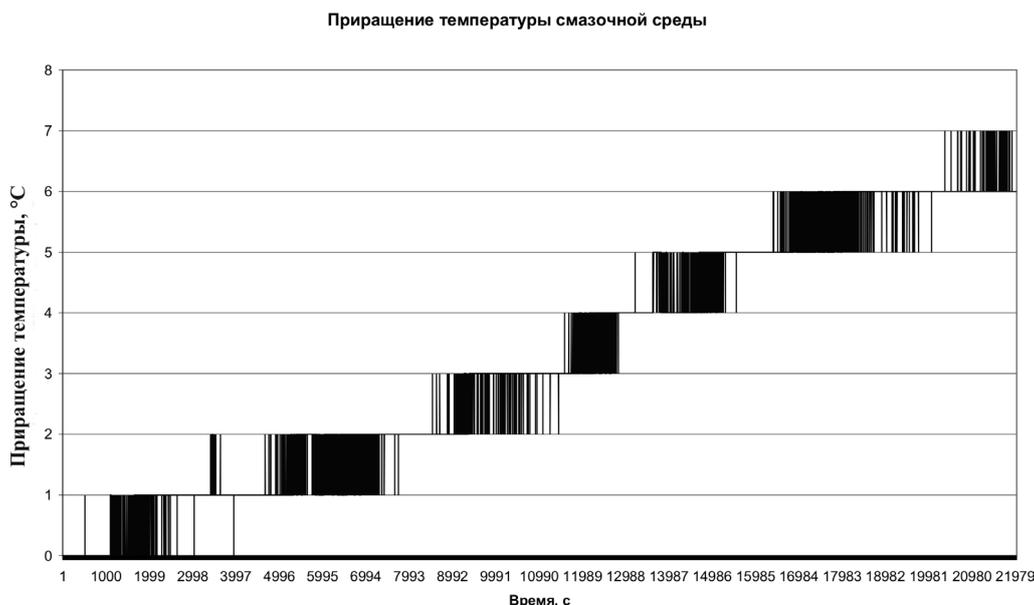


Рис. 8. Зависимость приращения температуры смазочной среды от времени Колodka без покрытия, ролик с титановым покрытием

Выводы

Проведенные исследования показали следующее:

- для формирования качественных титановых покрытий на чугунах перед нанесением покрытий необходимо проведение обезуглероживания поверхностных слоев чугуна, которое может проводиться в виде обезуглероживающего отжига;

- титановые покрытия, нанесенные на чугун, обеспечивают чугунным деталям высокую износостойкость, линейный износ деталей с титановыми покрытиями равен нулю при работе в паре с непокрытым чугуном;

- трибологические свойства пар трения, состоящих из деталей с покрытием и без покрытия, зависят от наличия покрытия на подвижной или неподвижной деталях. При нанесении титановых покрытий на неподвижную деталь пары трения наблюдается минимальный износ сопрягаемой непокрытой детали, при этом коэффициент трения имеет минимальное значение.

Список литературы

1. Гуляев А.П. *Металловедение: учебник для вузов.* – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Изучение роста износостойких слоев из карбида титана на твердых сплавах / Г.Л. Платонов,

В.Н. Аникин, А.И. Анисеев, Н.Н. Золоторева, М.Н. Нахимова, Р.Ф. Чебураева, К.Ф. Кузнецова, В.С. Торопченков // *Порошковая металлургия.* – 1980. – № 8. – С. 48–52.

3. Тушинский Л.И. Оптимизация структуры для повышения износостойкости сплавов // *Физика износостойкости поверхности металлов: сборник научных трудов / АН СССР, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе.* – Л.: Изд-во ФТИ, 1988. – С. 42–45.

4. Карпман М.Г. Выбор метода и способа диффузионного насыщения поверхности изделий // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1982. – № 4. – С. 19–20.

5. Земсков Г.В., Коган Р.Л., Шевченко И.М. Исследование некоторых свойств диффузионных слоев, содержащих бор // *Защитные покрытия на металлах: [республиканский межведомственный сборник научных трудов] / Академия наук УССР, Институт проблем материаловедения.* – Киев: Наукова думка, 1971. – Вып. 4. – С. 67–73.

6. Шаповалов В.П., Горбунов Н.С. Диффузионное титанирование стали // *Защитные покрытия на металлах: [республиканский межведомственный сборник научных трудов] / Академия наук УССР, Институт проблем материаловедения.* – Киев: Наукова думка, 1973. – Вып. 7. – С. 116–119.

7. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д. Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей // *Известия вузов. Физика.* – 2001. – № 11. – С. 269–270.

8. *Ворошнин Л.Г.* Многокомпонентные диффузионные покрытия. – Минск: Наука и техника, 1981. – 296 с.

9. Патент на изобретение № 2493289 Российская Федерация, МПК С 23 С 10/36, С 23 С 10/60. Способ диффузионного титанирования изделий из чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов, П.А. Суханов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Курганский государственный университет». – № 2012116651/02; заявлено 24.04.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 6 с.

10. *Соколов А.Г.* Разработка теоретических и технологических основ повышения стойкости режущего и штампового инструмента за счет диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.01.02. – Краснодар, 2008. – 369 с.

11. Патент на изобретение № 2439171 Российская Федерация, МПК С 21 D 5/10, С 21 D 3/04, С 23 С 10/22. Способ обработки чугунных изделий / А.Г. Соколов, Н.А. Крайнев; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский

государственный технологический университет». – № 2010114444/02; заявлено 12.04.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 6 с.

12. *Соколов А.Г., Артемьев В.П.* Повышение работоспособности инструмента методами диффузионной металлизации. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 228 с.

13. *Соколов А.Г., Крайнев Н.А.* Выбор элементов для диффузионной металлизации инструментальных сталей с целью повышения их работоспособности // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 12 Международной научно-практической конференции, 13–16 апреля 2010 г. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2010. – Ч. 2. – С. 352–357.

14. *Соколов А.Г., Крайнев А.Н.* Диффузионное титанирование как способ повышения стойкости инструментальных сталей // Технология металлов. – 2010. – № 4. – С. 44–49.

15. *Горкунов Д.Н.* Триботехника. Износ и безызносность: учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с. – (Для вузов). – ISBN 5-94327-004-3.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 60–68

The improvement of wear resistance of cast iron products by application of diffusion titanium coatings

Sokolov A.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sag-51@bk.ru

Bobylyov E.E., Ph.D. student, e-mail: ebobylyev@mail.ru

Kuban State Technological University, 2 Moskovskayast., Krasnodar, 350072, Russian Federation

Abstract

The cast iron is rather popular structural material for products and elements, operating in a sliding friction conditions. Nevertheless, functionability of cast iron in friction pairs is significantly limited by loads and speeds, acting on them. The analysis of the causes of failure of cast iron products is given. The reasons of cast irons wear resistance decrease are presented. It is shown that the effective way to improve the wear resistance of cast iron products is a diffusion titanizing. But the process of the application of diffusion titanium coatings have problematic nature, because diffusion layers consist of very fragile titanium carbides, that break off from surface even during process of cooling after process of titanizing. The results of studies of the process of diffusion titanizing of cast iron from the environment of fusible liquid metal solutions is given. The technology of formation of workable coatings, including decarbonizing anneal before

the process of titanizing is developed and patented. This technology provides a high quality functional wear-resistant titanium coating on the surface of the cast iron. Coating formed during 2 hours had the thickness of more than 30 μm . The microhardness of the coating is 25000 MPa, of substrate – 4000 MPa. A transition layer of low hardness (3200 MPa) is detected under the coating. The influence of diffusion titanizing on the wear resistance of cast iron products is investigated. The microstructure and composition of the obtained titanium coatings is investigated. The tribological properties of titanium coatings are investigated, the tribological properties of the friction pairs are investigated. The studies of tribological properties conducted by comparative “pad-roller” is given. The linear wear of coated part with titanium coating is zero, and the uncovered sample wear is 0.02 mm.

Keywords:

diffusion titanium coatings, iron cast products, properties of coatings, decarburization, improvement of wear resistance, tribological properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-60-68

References

1. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal Science]. 6th ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p.
2. Platonov G.L., Anikin V.N., Anikeev A.I., Zolotareva N.N., Nalimova M.N., Cheburaeva R.F., Kuznetsova K.F., Toropchenov V.S. Izuchenie rosta iznosostoikikh sloev iz karbida titana na tverdykh splavakh [Growth of wear-resistant titanium carbide layers on hard metals]. *Poroshkovaya metallurgiya – Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1980, no. 8, pp. 48–52. (In Russian)
3. Tushinsky L.I. [Optimization of the structure to improve the wear resistance of alloys]. “*Fizika iznosostoičnosti poverkhnosti metallov*”: *sbornik nauchnykh trudov* [Collected papers “Physics wear of metal surfaces”], Leningrad, FTI Publ., 1988, pp. 42–45.
4. Karpman M.G. Vybora metoda i sposoba diffuzionnogo nasyshcheniya poverkhnosti izdelii [Choice of method and procedure for diffusion impregnation of article surfaces]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1982, no. 4, pp. 19–20. (In Russian)
5. Zemskov G.V., Kogan R.L., Shevchenko I.M. [The study of some properties of the diffusion layers containing boron]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh* [Protective coatings on metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971, iss. 4, pp. 67–73.
6. Shapovalov V.P., Gorbunov N.S. [Diffusion Titanation of Steel]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh* [Protective Coatings on Metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1973, iss. 7, pp. 116–119.
7. Gur’ev A.M., Lygdenov B.D. Vliyanie sostava nasyshchayushchei sredy na strukturu i svoystva diffuzionnogo sloya pri titanirovanii stali [Influence of saturating environment on the structure and properties of the diffusion layer at titanation steels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2001, no. 11, pp. 269–270. (In Russian)
8. Voroshnin L.G. *Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytiya* [Multicomponent diffusion coatings]. Minsk, Nauka i rekhnika Publ., 1981. 296 p.
9. Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.E., Frolov V.A., Sukhanov P.A. *Sposob diffuzionnogo titanirovaniya izdelii iz chuguna* [Method of diffusion titanizing of cast iron products]. Patent RF, no. 2493289, 2013.
10. Sokolov A.G. *Razrabotka teoreticheskikh i tekhnologicheskikh osnov povysheniya stoikosti rezhushchego i shtampovogo instrumenta za schet diffuzionnoi metallizatsii iz sredy legkoplavkikh zhidkometallicheskikh rastvorov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of theoretical and technological foundations for increasing the resistance of the cutting and punching tools due to the diffusion of plating medium of low-melting liquid metal solutions. Dr. eng. sci. diss.]. Krasnodar, 2008. 369 p.
11. Sokolov A.G., Krainev N.A. *Sposob obrabotki chugunnykh izdelii* [Cast-iron ware processing method]. Patent RF, no. 2439171, 2012.
12. Sokolov A.G., Artem’ev V.P. *Povyshenie rabotosposobnosti instrumenta metodami diffuzionnoi metallizatsii* [Increase efficiency tool by diffusion metallization]. Rostov-on-Don, SKNTs VSh Publ., 2006. 228 p.
13. Sokolov A.G., Krainev A.N. [Selecting elements for diffusion metallization tool steels to improve their efficiency]. *Materialy 12 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Resursosberegayushchie tekhnologii re-*

monta, vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin, mekhanizmov, oborudovaniya, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki ot nano- do makrourovnya” [Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference “Resource-saving technology of repair, restoration and strengthening of machine parts, machinery, equipment, tools and tooling from the nano- to the macro level”]. Saint Petersburg, 2010, pt. 2, pp. 352–357.

14. Sokolov A.G., Krainev A.N. Diffuzionnoe titanirovaniye kak sposob povysheniya stoikosti instrumental’nykh stalei [Diffusive titanizing as method of improvement in tool steel resistance]. *Technologiya Metallov – Technology of metals*, 2010, no. 4, pp. 44–49.

15. Gorkunov D.N. *Tribotekhnika. Iznos i bezyznosnost’* [Tribology. Wear. Wearless]. 4th ed. Moscow, MSKhA Publ., 2001. 616 p. ISBN 5-94327-004-3

Received 17 December 2014

Revised 12 January 2015

Accepted 29 January 2015