



**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ШЕЕК КОЛЕНЧА-  
ТЫХ ВАЛОВ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫ-  
ЛЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПЛА-  
СТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

✉<sup>1</sup>**Иванников Валерий Александрович**  
кандидат технических наук, заведующий ка-  
федрой производства, ремонта и эксплуата-  
ции машин ФГБОУ ВО «Воронежский госу-  
дарственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ,  
e-mail: ivannikov\_vrn@mail.ru

**Бухтояров Владимир Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры производства, ремонта и  
эксплуатации машин ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
лесотехнический университет имени  
Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

**Чупахин Александр Викторович**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры технический сервис и  
технология машиностроения ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный аграрный  
университет имени императора Петра I»,  
г. Воронеж, РФ

**Крухмалев Сергей Николаевич**  
преподаватель кафедры производства,  
ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ  
ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет имени  
Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

**Аннотация.**

Существующие методы повышения прочност-  
ных характеристик деталей не всегда обеспечи-  
вают необходимые характеристики рабочих по-  
верхностей. И как следствие долговечность де-  
талей падает, в последующем требуется прово-  
дить дорогостоящий ремонт узла или агрегата.  
В статье рассмотрен способ упрочнения по-

**INCREASING THE STRENGTH  
CHARACTERISTICS OF CRANKSHAFT  
NECKS BY PLASMA SPRAYING  
FOLLOWED BY PLASTIC  
DEFORMATION**

✉<sup>1</sup>**Ivannikov Valery Alexandrovich**  
candidate of technical sciences, head of department  
of production, repair and operation of cars Federal  
State Budget Educational Institution of Higher Ed-  
ucation "Voronezh State University of Forestry and  
Technologies named after G.F. Morozov", Voro-  
nezh, RF, e-mail: ivannikov\_vrn@mail.ru

**Bukhtoyarov Vladimir Nikolaevich**  
candidate of technical sciences, associate profes-  
sor of production, repair and operation of cars  
Federal State Budget Educational Institution of  
Higher Education "Voronezh State University of  
Forestry and Technologies named after G.F.  
Morozov", Voronezh, RF

**Chupakhin Alexander Viktorovich**  
candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor of the Department of Technical  
Service and Technology of Mechanical  
Engineering FSBEI HE "Voronezh State  
Agrarian University named after Emperor  
Peter I", Voronezh, RF

**Tsuev Muslim Magomedovovich**  
teacher of the department of production, repair  
and operation of cars Federal State Budget Edu-  
cational Institution of Higher Education "Voro-  
nezh State University of Forestry and Technol-  
ogies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

**Annotation.**

Existing methods of increasing the strength  
characteristics of parts do not always provide the  
necessary characteristics of the working surfac-  
es. And as a result, the durability of the parts  
decreases, in the future it is necessary to carry  
out expensive repairs of the unit or unit. The ar-  
ticle considers a method of surface hardening,

верхностей, который может быть применим для деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, в частности коленчатых валов. Использование пластического деформирования плазменных покрытий позволяет повысить основные прочностные характеристики поверхности. Работа может быть полезна работникам авторемонтного производства, автосервисов и автотранспортных предприятий.

**Ключевые слова:** ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, КОЛЕНЧАТЫЙ ВАЛ, ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ.

which can be applicable to parts operating under alternating loads, in particular crankshafts. The use of plastic deformation of plasma coatings makes it possible to increase the basic strength characteristics of the coating. The work can be useful to employees of car repair production, car service stations and motor transport enterprises.

**Keywords:** PLASMA SPRAYING, CRANK-SHAFT, PLASTIC DEFORMATION, COATING QUALITY.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

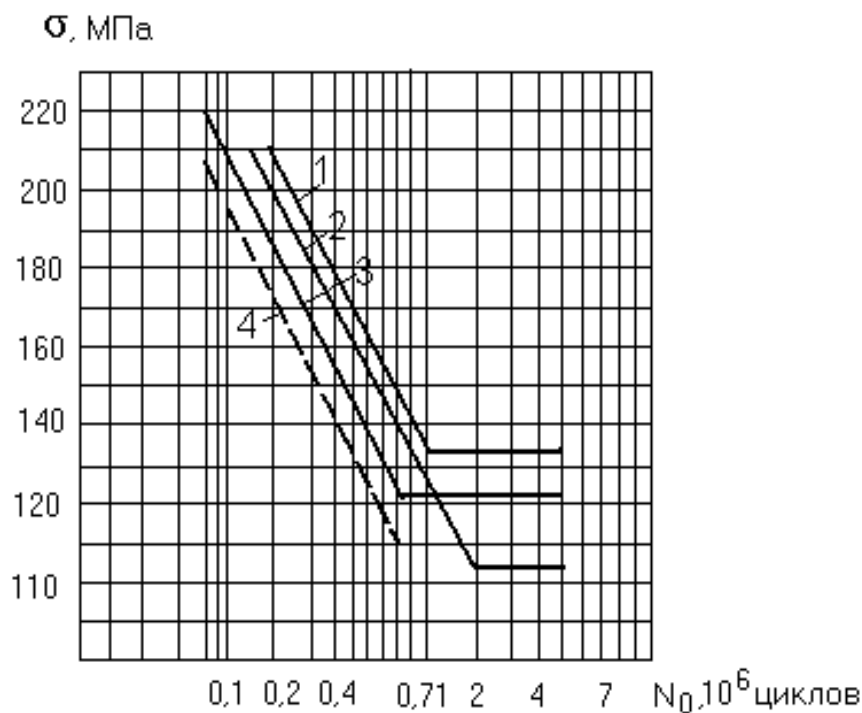
### **1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Один из эффективных способов повышения работоспособности и повышения долговечности деталей машин и механизмов – нанесение на их рабочую поверхность плазменных покрытий (ПП). Прочностные и пластические свойства ПП вследствие специфической структуры, характеризующейся наличием пор и оксидов, ниже, чем у монолитных материалов [1]. Все это пагубно влияет при использовании ПП при упрочнении и восстановлении такой дорогостоящей детали как коленчатый вал.

Существует много технологических решений, позволяющих повысить прочность покрытий до характеристик, обеспечивающих нормальные условия работы деталей при знакопеременных нагрузках. К числу таких деталей относятся коленчатый вал. К способам повышающих прочностные характеристики покрытий относятся термическое, механическое или термомеханическое воздействие. Способом, который позволяет уменьшить пористость покрытий, повысить сопротивление усталости деталей, создать необходимые напряжения в покрытии является последующее пластическое деформирование роликом или шариком.

Следует отметить, что данные о допустимых уровнях нагрузок и деформаций, при которых ПП сохраняют свою целостность, а, следовательно, и работоспособность, мало изучены [2]. Это затрудняет выбор материалов покрытий и установку пределов их работоспособности. При исследовании прочностных характеристик нужно учитывать технологические режимы обкатывания, при несоблюдении последних происходит либо разрушение покрытия, либо оно будет не упрочнено и останется пористым. А от этого падает качество поверхности. В то же время, необходимо учитывать физико-механические свойства покрытия, внутри которого могут происходить развитие дефектов, вызванных особенностями материала или структуры наносимого слоя плазменным напылением.

Работоспособность упрочненного коленчатого вала, определяется не только износостойкостью его рабочих поверхностей, но и его склонностью к усталостному разрушению, которое зависит от большого количества факторов. К таким факторам относят наличие пор и микротрещин в покрытии, характер внутренних напряжений в детали и покрытии, физико-механические свойства покрытия и т.д. В качестве примера рассмотрим исследование сопротивления усталости реального коленчатого вала двигателя СМД-14. На рисунке 1 представлено как работают разные коленчатые валы: новые, изношенные и восстановленные наплавкой. Представленный график показывает, что в процессе эксплуатации накапливаются значительные дефекты, вызывающие снижение сопротивления усталости. Кроме того, различного рода технологические воздействия (наплавка, напыление и т.д.) тоже снижают предел выносливости [1].



$\sigma$  – временное сопротивление усталости;  $N_0$  – число циклов нагружения; 1 – нового вала; 2 – восстановленного наплавкой; 3 – предельно изношенного; 4 – границы безопасности для восстановленного вала

Рисунок 1 – Сопротивление усталости коленчатого вала СМД-14

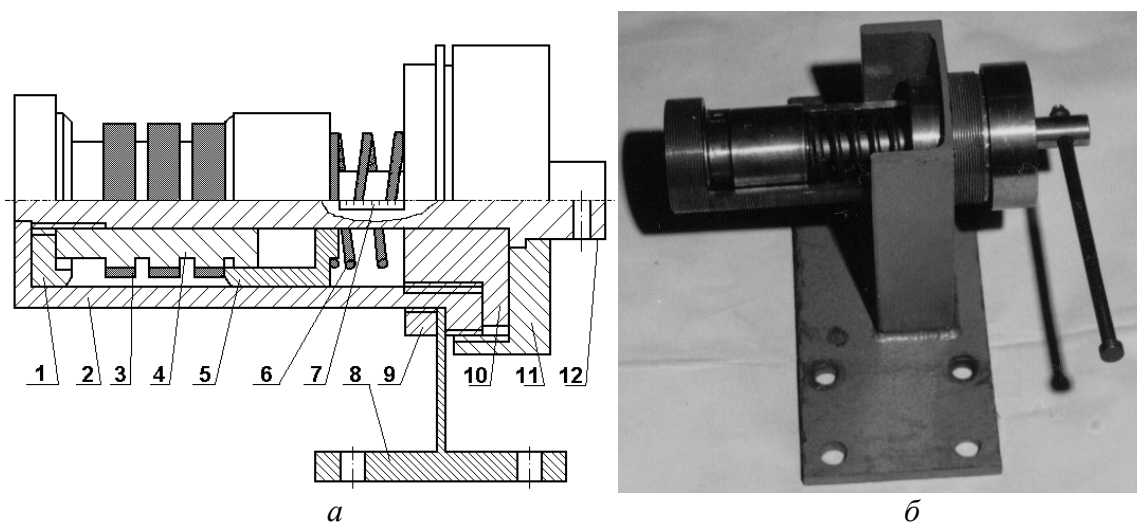
Во многих источниках информации рассматриваются показатели значительно влияющие на предел выносливости: наличие микронеровностей, концентраторов напряжений (острых граней, недорезов и т.д.), вид напряжений на поверхности (сжимающие или растягивающие); метод упрочнения, а вернее сумма технологических особенностей способа упрочнения. Пагубнее всего на сопротивление усталости влияет наличие растягивающих напряжений, вызывающих растрескивание поверхностного слоя и как следствие разрушение всей детали. Так же наличие трещин, микротрещин или иных концентраторов напряжений, являющихся источником зарождения усталостной трещины [3].

В работе предлагается пластически деформировать ПП после напыления для повышения основных прочностных характеристик, что позволяет увеличить сопротивление усталости за счет создания напряжений сжатия и уменьшения количества пор. Описание процесса пластического деформирования ПП можно представить следующим образом. При пластическом деформировании плазменных покрытий необходимо ввести условие пластичности, характеризующиеся механическим воздействием на определенный объем материала. Причем в процессе пластического деформирования происходит «залечивание» пор и микропор, под действием обкатывающего инструмента происходит воздействие на структурные составляющие: зерна, карбиды, оксиды, мартенсит и другие составляющие. В результате роста нагрузок происходит сливание областей механического воздействия, что способствует образованию связанных между собой областей, которые можно назвать пластическими кластерами. Размер кластеров на прямую зависит от прикладываемых удельных нагрузок на поверхность. Наступает момент, когда все покрытие деформируется, образуя один единый пластический кластер, при этом может быть затронут и основной материал, на который наносится покрытие. Большим пластическим деформациям препятствует связанная совокупность упругих областей (упругий кластер), пронизывающая представительный объем. С ростом нагрузки все большее количество материала переходит в пластическое состояние, сквозной пластический кластер усиливается, а сквозной упругий – «тает». Наконец, он разрывается, и с этого момента начинается пластическое течение представительного объема. Как видим, поведение пори-

стого тела при нагружении определяется геометрией упругих и пластических кластеров, причем новое в поведении появляется при возникновении сквозного пластического кластера и исчезновении сквозного упругого. Можно предположить, что развитие пластической деформации описывается в приближении теории протекания [4], которая характеризует критические явления, определяемые соединением значительного количества элементов, характеризующих случайный характер соединения между элементами. При этом можно установить характерные размеры кластеров и долю сквозного кластера, обеспечивающую передачу через него того или иного процесса (тока, тепла, нагрузки).

## 2 Материалы и методы

Исследовали ПП, нанесенные различными способами: традиционное плазменное напыление (без какой либо обработки) и плазменные покрытия обработанные роликами. Применяли материалы, которые широко используются для изготовления и восстановительного ремонта деталей машиностроения, работающих в узлах трения. В качестве материала основы использовали сталь 45, как наиболее распространенный материал. Плазменное напыление производили на установке, разработанной на кафедре производства, ремонта и эксплуатации машин ВГЛУ; для нанесения покрытий использовали плазматрон ЭДП-104. Для напыления использовали порошки на основе никеля (ПГ-СР4, ПГ-СР3 и т.д.).



1 – чашка; 2 – корпус; 3 – покрытие; 4 – пуансон (образец с покрытием); 5 – матрица; 6 – тарированная пружина; 7 – шкала; 8 – державка; 9 – фиксирующее кольцо; 10 – втулка; 11 – крышка; 12 – нагружающий винт

Рисунок 2 – Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) устройства для определения прочности соединения покрытия с основным металлом на сдвиг

Для оценки прочности сцепления ПП с основой использовали метод сдвига, осуществляли процесс испытания на приспособлении, представленном на рисунке 2 [3]. Для исследования микроструктуры и ее фотографирования использовали микроскоп МИМ-7. Для исследования износостойкости применялась пара трения «ролик – втулка». Для имитации условий работы сопрягаемой пары трения «шейка коленчатого вала – вкладыш» использовали машину трения МИ-1М. Применялся весовой метод определения износа на весах аналитических WA-31 с точностью  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$  кг.

## 3 Результаты исследований

Характер разрушения покрытий из порошковых материалов (ПГ-СР4), нанесенных методом плазменного напыления с последующей пластической деформацией (обкаткой роликом), иной. Эти покрытия отличаются от традиционных ПП минимальным количеством

пор и оксидов (около 3 ... 5 %) [5-8].

При деформировании образцов плазменными покрытиями они сохраняют свою сплошность до напряжений порядка предела текучести основы. По достижении указанных напряжений происходит нарушение адгезионной связи, отслоение покрытия от основы с распространением трещин от границы контакта покрытие – основа в вышележащие слои покрытия с выходом на поверхность. Кроме того, образуются видимые трещины из пор покрытия, создающие внутренние надрывы без выхода на поверхность. Разрушение этих покрытий происходит также при напряжениях порядка предела текучести металла основы. Таким образом, разрушение покрытий этого типа носит адгезионный характер.

Прочность сцепления покрытий при использовании обкатки роликами находится в пределах 100 ... 110 МПа. Данное значение превышает прочность сцепления традиционных плазменных покрытий (60 МПа) приблизительно в 2 раза [4].

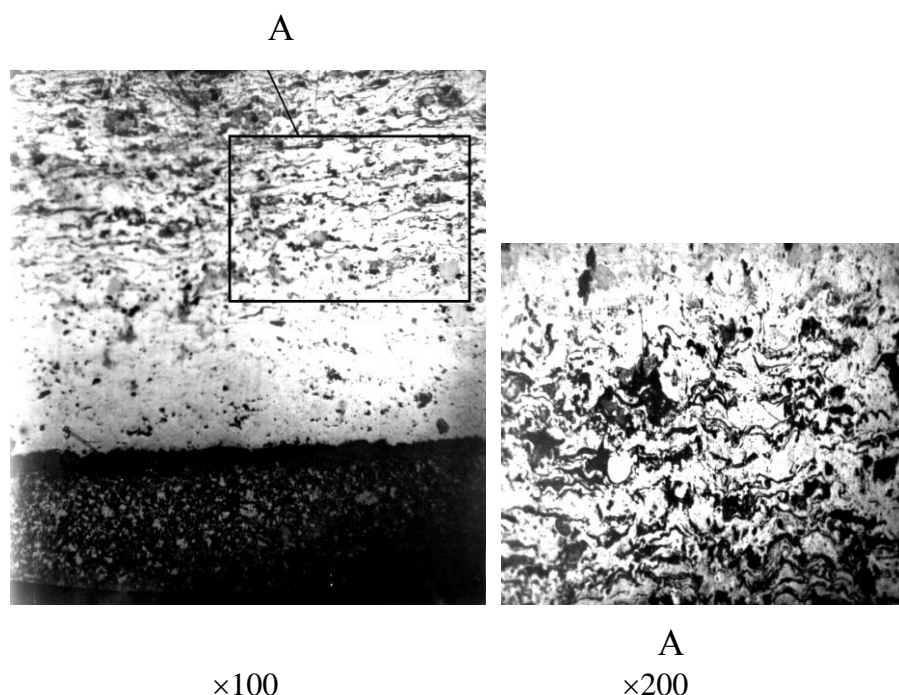


Рисунок 3 – Фотографии микроструктуры покрытий  
напыленного традиционным способом

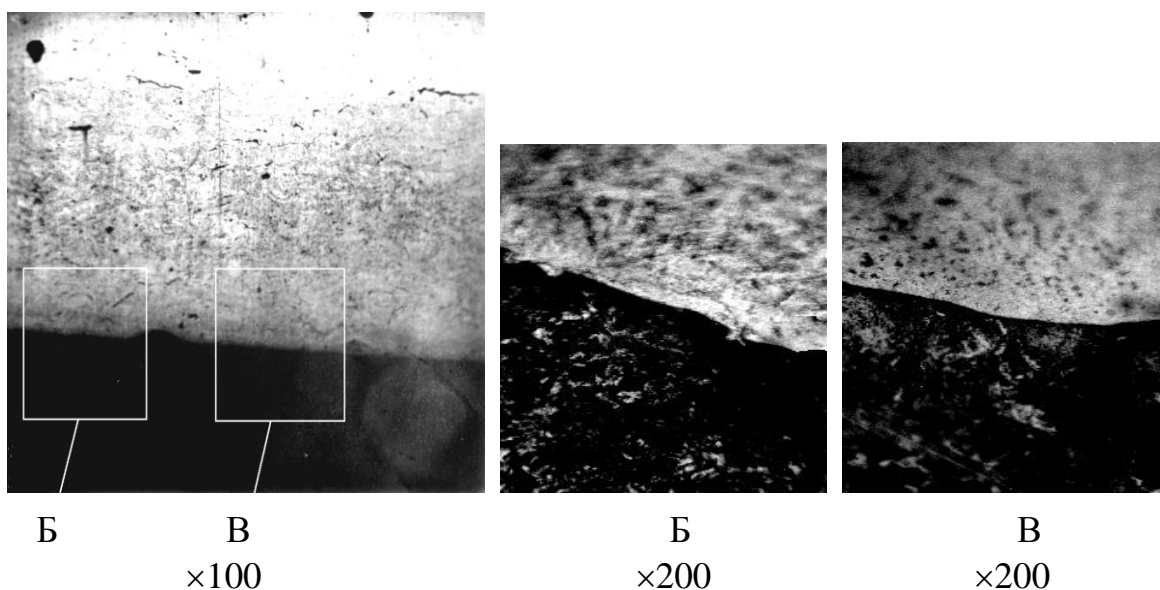


Рисунок 4 – Фотографии микроструктуры покрытий после обкатки роликами

На рисунке 3 представлена структура ПП напылённого традиционным способом. Данная структура характеризуется наличием большого количества оксидов и пор. На рисунке 4 представлена микроструктура плазменного покрытия полученного из самофлюсующего порошка на основе никеля и хрома (ПГ-СР4). Покрытие после напыления подвергли обкатке роликом, что значительно улучшило структуру. На фотографии видно равномерное распределение упрочняющих структур покрытия в виде черных точек. Упрочняющие структуры, представляют собой частицы, которые имеют большую микротвердость в сравнении с основной матрицей и представлены в виде боридов, карбидов и оксидов.

Такое равномерное распределение более твердых микрочастиц способствует повышению износостойкости покрытия. В основном, механизм изнашивания у данного вида пар трения (втулка – ролик) – абразивный. Абразивное изнашивание характеризуется отрывом мелких, более твердых частиц (боридов, карбидов, оксидов и т.д.) с поверхности покрытия. Чем меньше размер частиц и более равномерно они распределены в матрице покрытия, тем больше износостойкость сопрягаемой пары трения [9-12].

Проведённые исследования износостойкости подтвердили наши предположения о повышении основных характеристик покрытий после пластического деформирования (рис. 5).

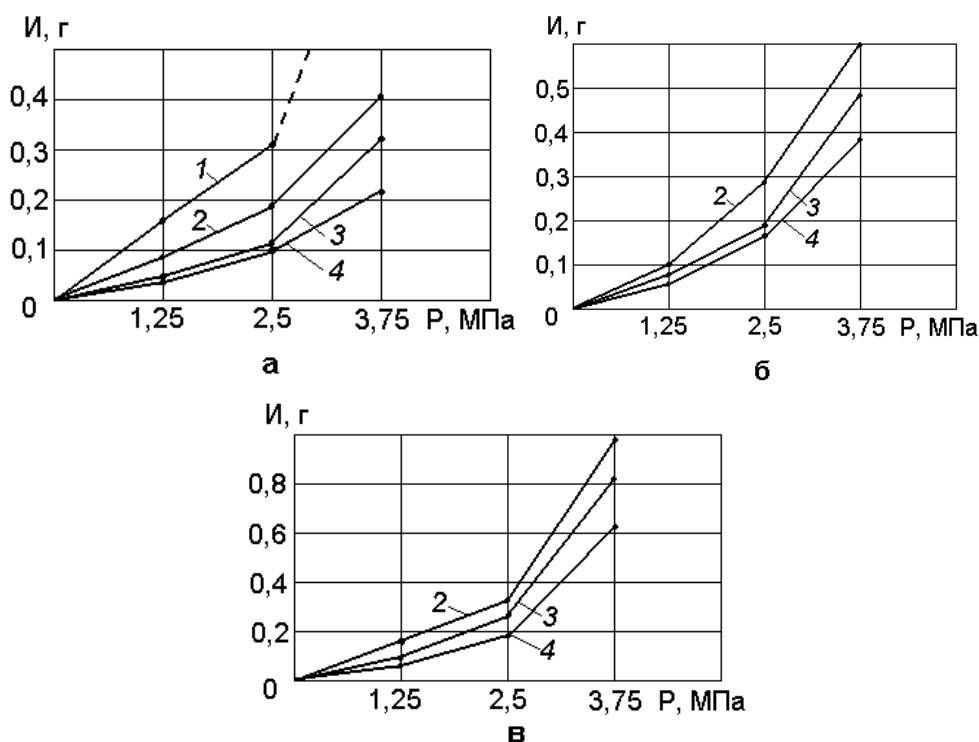


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  материала (износ на 3000 м пути трения) абразивно-масляной прослойкой от удельной нагрузки  $P$  и скорости скольжения  $v$  (схема «диск-колодка»): а)  $v = 0,78$  м/с; б)  $v = 1,30$  м/с; в)  $v = 2,60$  м/с; 1 – сталь 45, закаленная до 58 HRCэ; 2 – сталь 45 с традиционно напыленным покрытием ПГ-СР1; 3 – сталь 45 с традиционно напыленным покрытием ПГ-СР4; 4 – сталь 45 с покрытием ПГ-СР4 обкатанных роликами

В процессе исследования сравнение износостойкости покрытий осуществлялось из порошка ПГ-СР1 и ПГ-СР4 без пластического деформирования и с использованием обкатки роликом. Так же испытание осуществлялось при различных нагрузках, характерных для сопрягаемых пар трения, а именно при удельной нагрузке 1,25, 2,5 и 3,75 МПа. В качестве эталона использовались образцы, изготовленные из стали 45 закаленные до твердости 60 единиц по шкале Роквелла. Испытания показали, что в среднем износостойкость с использованием пластической деформации покрытий увеличилась на 50 %.

Результаты в виде графических зависимостей представлены на рисунке 5.

#### 4 Обсуждение и заключение

Характер разрушения исследуемых плазменных покрытий при обкатке покрытий роликом зависит от соотношения между когезионной прочностью материала покрытия и адгезионной прочностью на границе раздела покрытие – основа, которое определяется главным образом их пористостью и окисленностью. Прочность сцепления покрытий при использовании обкатки роликами превышает прочность сцепления традиционных плазменных покрытий приблизительно в 2 раза. Износостойкость покрытий с использованием обкатки роликом повышается приблизительно в 1,5 раза.

Все выше изложенное позволяет утверждать, что использование обкатки роликом плазменных покрытий, может быть использовано для упрочнения шатунных и коренных шеек коленчатых валов.

#### Список литературы

- 1 Черноиванов, В. И. Восстановление коленчатых валов / Черноиванов В. И., Лялякин В. П. // Техника в сельском хозяйстве – 1986. – № 1. – С. 57-59.
- 2 Яковлев, К. А. Разработка процесса термомеханического упрочнения поверхностей с газотермическими покрытиями : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Яковлев К. А. / Воронежская гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 1998 – 17 с.
- 3 Бухтояров, В. Н. Технология восстановления цилиндрических поверхностей валов плазменным напылением с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой (на примере коленчатого вала) : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Бухтояров В. Н. / Воронежская гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2003. – 16 с.
- 4 Кадырметов, А. М. Технологические перспективы и возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий / А. М. Кадырметов, С. И. Сушков, В. О. Никонов // Строительные и дорожные машины. – 2013 г. – № 7. – С. 25-32.
- 5 Посметьев, В. И. Свойства покрытий, упрочненных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник – 2013. – № 1 (3) – С. 34-41.
- 6 Никонов, В. О. Разработка комбинированного способа нанесения и упрочнения покрытий / В. О. Никонов // Инновационные разработки молодых ученых Воронежской области на службу региона : сборник докладов Региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Воронеж, 16-17 апреля 2012 г. / Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере ; Прав. Вор. обл. ; ВИТЦ. – Воронеж, 2012. – С. 148-149.
- 7 Тополянский, П. А. Плазменные технологии нанесения покрытий / Сварщик № 3, 2002 г., С. 10 – 11.
- 8 Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение. – 1987. – 192 с.
- 9 Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та. – 2008. – 406 с.
- 10 Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением (Под ред. Б. Е. Патона). – Машиностроение. – М. – 1974.
- 11 Тимохова, О. М. Вопросы технологического обеспечения плазменного напыления и упрочнения покрытий деталей машин [Электронный ресурс] / О. М. Тимохова, А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Л. Махонин // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т. 4, № 4 (22). – С. 16-31. Режим доступа : <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2017/4-22-2017/16-31.pdf>.
- 12 Кадырметов, А. М. Технологические перспективы и возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий / А. М. Кадырметов, С. И. Сушков, В. О. Никонов // Строительные и дорожные машины. – 2013 г. – № 7. – С. 25-32.

## References

- 1 Chernoiyanov, V. I. Restoration of crankshafts / Chernoiyanov V. I., Lyalyakin V. P. // *Technique in agriculture* – 1986. – №. 1. – pp. 57-59.
- 2 Yakovlev, K. A. Development of the process of thermomechanical hardening of surfaces with gas-thermal coatings : Abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences : 05.03.01 / Yakovlev K. A. / Voronezh State Forestry Engineering. acad. – Voronezh, 1998 – 17 p.
- 3 Bukhtoyarov, V. N. Technology of restoring cylindrical surfaces of shafts by plasma spraying with simultaneous melting by a remote modulated arc (using the example of a crankshaft) : Autoref. dis. ... Candidate of Technical Sciences : 05.03.01 / Bukhtoyarov V. N. / Voronezh State Forestry Engineering. acad. – Voronezh, 2003. – 16 p.
- 4 Kadyrmetov, A. M. Technological prospects and possibilities of plasma deposition and hardening of coatings / A. M. Kadyrmetov, S. I. Sushkov, V. O. Nikonov // *Construction and road machines*. – 2013 – №. 7. – pp. 25-32.
- 5 Posmetyev, V. I. Properties of coatings hardened by plasma spraying with simultaneous electromechanical processing / V. I. Posmetyev, A. M. Kadyrmetov, V. O. Nikonov, A. S. Pustovalov // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin* – 2013. – №. 1 (3) – pp. 34-41.
- 6 Nikonov, V. O. Development of a combined method for applying and hardening coatings / V. O. Nikonov // *Innovative developments of young scientists of the Voronezh region for the service of the region : collection of reports of the Regional Scientific Conference of Students, postgraduates and Young Scientists, Voronezh, April 16-17, 2012 / Foundation for the Promotion of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere ; Prav. Vor. region ; VITC*. – Voronezh, 2012. – pp. 148-149.
- 7 Topolyansky P. A. Plasma coating technologies / *Svarshik* №. 3, 2002, pp. 10-11.
- 8 Sidorov, A. I. Restoration of machine parts by spraying and surfacing / A. I. Sidorov. – M. : *Mechanical Engineering*. – 1987. – 192 p.
- 9 Sosnin, N. A. Plasma technologies. Manual for engineers / N. A. Sosnin, S. A. Ermakov, P. A. Topolyansky. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. un-ta. – 2008 – 406 p.
- 10 *Technology of electric welding of metals and alloys by melting* (Ed. by B. E. Paton). – Mechanical engineering. – M. – 1974.
- 11 Timokhova, O. M. Issues of technological support of plasma spraying and hardening of coatings of machine parts [Electronic resource] / O. M. Timokhova, A. M. Kadyrmetov, E. V. Snyatkov, V. L. Mahonin // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2017. – Vol. 4, №. 4 (22). – pp. 16-31. Access mode : <http://vestnikvgtlta.ru/arhiv/2017/4-22-2017/16-31.pdf>.
- 12 Kadyrmetov, A. M. Technological prospects and possibilities of plasma deposition and hardening of coatings / A. M. Kadyrmetov, S. I. Sushkov, V. O. Nikonov // *Construction and road machines*. – 2013 – №. 7. – pp. 25-32.

© Иванников В.А., Бухтояров В.Н., Чупахин А.В., Крухмалев С.Н., 2021