

УДК 621.793

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ НАНЕСЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ  
ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ***д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);**А.П. ЯЛОВИК**(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты исследования по восстановлению валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией. Показана возможность использования технологии гиперзвуковой металлизации комбинированных износ- и коррозионностойких покрытий, состоящих из сталей мартенситного и аустенитного классов, для восстановления изношенных хромированных валов. Разработана технология формирования комбинированных покрытий одновременным распылением проволок из сталей мартенситного и аустенитного классов методом гиперзвуковой металлизации с последующим трибомодифицированием.*

**Ключевые слова:** гиперзвуковая металлизация, хромированные валы, восстановление, комбинированные покрытия, трибомодифицирование.

**Введение.** Одним из наиболее эффективных путей решения задачи повышения ресурса и улучшения работоспособности пар трения скольжения типа «вал – втулка», эксплуатирующихся при повышенных удельных нагрузках, является использование композиционных пластичных смазок в сочетании с технологиями, обеспечивающими формирование металлических покрытий толщиной 0,05...0,5 мм методами газотермического напыления порошковых или проволоочных материалов [1–4].

Покрытия из цветных металлов и низколегированных сталей, которые, как правило, мягче материала стальных или чугунных деталей, позволяют сравнительно легко обеспечить правило положительного градиента, согласно которому процесс деформирования отдельных, наиболее нагруженных, участков поверхностей трения должен проходить только в поверхностных слоях, не вовлекая в деформацию слои, расположенные ниже [5]. В этом случае контурные давления, возникающие в подвижном сопряжении, будут восприниматься жестким основанием. Площадь фактического контакта при использовании покрытий толщиной до 1 мм будет меньше, чем при использовании относительно толстых (1 мм и более). Слой относительно мягкого покрытия позволяет улучшить прирабатываемость деталей пар трения и способствует образованию в процессе трения адаптационных, субмикроскопических поверхностных пленок, обладающих повышенной адсорбционной способностью к смазочным материалам. Однако в силу низкой износостойкости данных покрытий их не применяют для восстановления шеек валов.

**Цель и задачи исследования**

Как показал сравнительный анализ методов восстановления стальных и чугунных деталей узлов трения скольжения [6; 7], наиболее эффективной и экономичной технологией является гиперзвуковая металлизация (ГМ) стальными и композиционными проволоками.

В дальнейшем технология, использующая метод ГМ была усовершенствована за счет применения метода трибомодифицирования [8]. На поверхность покрытия, полученного путем нагрева и распыления проволок из сталей мартенситного или аустенитного классов, наносили слой смазки, содержащей ультрадисперсный порошок шихты алмазосодержащей «ША» и осуществляли приработку в узле трения при удельной нагрузке 32...40 МПа и скорости скольжения 0,2...1,0 м/с. При всех значительных преимуществах этой технологии она обладает таким существенным недостатком, как невозможность ее использования взамен гальванического хромирования или при восстановлении изношенных хромированных деталей, поскольку у газотермических покрытий, напыленных известными стальными проволоками, отсутствует необходимое сочетание значений твердости и коррозионной стойкости. Если покрытие наносить распылением только проволок мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4%, то вследствие относительно высокой твердости покрытия будет отсутствовать эффект трибомодифицирования, который обеспечивается смазкой с алмазосодержащей шихтой, помимо того, покрытие не будет обладать высокой коррозионной стойкостью. Если же использовать проволоки только из сталей аустенитного класса, то будет обеспечен процесс трибомодифицирования и высокая стойкость покрытий в агрессивных средах, но при этом покрытие будет иметь недостаточную твердость.

Требуемое сочетание свойств обеспечивают композиционные проволоочные материалы, состоящие из никелевой трубчатой оболочки и износостойкого порошкообразного наполнителя, однако стоимость таких материалов в 4,0...6,5 раз больше стоимости литых стальных проволок.

Разработка технологии, позволяющей восстанавливать ранее хромированные валы нанесением покрытий с необходимым уровнем износо- и коррозионной стойкости и явилась целью представленного исследования.

#### **Оборудование и методики исследований**

Для исследования были выбраны хромсодержащие стали мартенситного класса с содержанием углерода от 0,2 до 1,1% и хрома от 13 до 18%, дополнительно легированные никелем, марганцем, ванадием, молибденом, вольфрамом, кремнием следующих марок: 20X13, 30X13, 40X13, 40X15H7Г7Ф2МС, 45X14H14B2M, 65X13, 90X18МФ, 95X18, 110X18М, а также высокохромистые никельсодержащие стали мартенситного класса с содержанием углерода от 0,08 до 0,17%, хрома – 18...25% и никеля 9...16%, дополнительно легированные титаном, следующих марок: 08X18H10Т, 12X18H9Т, 12X18H10Т, 12X18H12Т, 12X25H16Т7, 17X18H9.

Для газотермического напыления композиционных покрытий использовались проволоки диаметром 1,5, 1,6, 1,8 и 2,0 мм в различных сочетаниях. Нанесение покрытий осуществлялось на установке гиперзвуковой металлизации АДМ-10 на режимах, соответствующих паспортным, для распыления стальных проволок.

Содержание остаточного аустенита в газотермических покрытиях оценивалось методом рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном  $\text{CoK}_\alpha$  излучении. Съемка образцов осуществлялась при ускоряющем напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ и анодном токе 10 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения проводилась в режиме сканирования (по точкам) с фиксированным временем счета 10 с на точку.

**Результаты экспериментов.** Одним из возможных подходов формирования композиционных газотермических покрытий, отвечающих принципу Шарпи (материал, отвечающий высоким требованиям по износостойкости, должен состоять из сплошной вязкой матрицы, в которой расположены твердые структурные составляющие), может быть одновременное распыление стальных проволок аустенитного и мартенситного классов. При этом частицы аустенитной стали образуют вязкую коррозионно-стойкую матрицу, в которой на стадии приработки узла трения может быть реализован эффект трибомеханического модифицирования с формированием наноразмерной зеренной ячеистой субструктуры [8], а частицы мартенситной стали образуют дисперсные включения с повышенным содержанием остаточного аустенита [9], в котором на начальной стадии эксплуатации будут протекать деформационно активируемые  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с образованием твердых включений мартенсита деформации.

Для обеспечения достаточно высокого содержания упрочняющей фазы в композиционном покрытии содержание остаточного аустенита в нем должно быть в пределах 45...60 об.%. При его содержании менее 45 об.% количество формирующегося мартенсита деформации и твердость покрытия после приработки будут недостаточными для обеспечения высокой абразивной износостойкости рабочего слоя, а при содержании более 60 об.% после приработки может сформироваться чрезмерно твердое покрытие низкой трещиностойкости, которое будет иметь недостаточную износостойкость в условиях ударных нагрузок. Вязкая и износостойкая матрица композиционного покрытия может быть получена в процессе трибомеханического модифицирования элементов газотермического покрытия, сформированных из напыленных частиц аустенитной стали, с образованием в них наноразмерной субзеренной структуры, в то время как твердые включения образуются в результате  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в напыленных частицах мартенситной стали в процессе деформационного воздействия при приработке.

Поскольку механические и физические свойства высокохромистых аустенитных сталей определяются количеством аустенита, перешедшего в мартенсит, а также температурой мартенситного превращения (чем ниже, тем лучше), необходимо, чтобы концентрация никеля в высокохромистой стали аустенитного класса, как одного из наиболее активных аустенитообразующих элементов, составляла не менее 10 об.%.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал (таблица 1), что для формирования покрытий с содержанием остаточного аустенита в пределах 45...60% (опыты № 8, 9, 12, 13, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 28, 29, 32, 33) необходимо, чтобы в качестве материала одной из проволок использовалась высокохромистая сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее 10%, в качестве другой проволоки – высокохромистая сталь мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4%, причем ее диаметр должен быть в 1,12...1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса.

Для практической проверки полученных результатов исследований были выбраны для восстановления изношенные хромированные штоки гидроцилиндров выправочно-подбивочно-рихтовочной маши-

ны ВПР, используемой при ремонте железнодорожного полотна. У изношенных штоков на рабочей поверхности наблюдались риски, вырывы, отслаивания хромового покрытия, царапины, следы схватывания и коррозии. Кроме этого, в соединении штока с поршнем обнаруживались следы стирания и вмятин, а на торцевых участках, контактирующих с поршнем, – царапины и следы схватывания. Износ составлял в среднем 0,15 мм, что не позволяло применять повторное хромирование рабочих поверхностей штоков.

Таблица 1. – Зависимость содержания остаточного аустенита в покрытиях после гиперзвуковой металлизации различными сочетаниями проволок (проволока 1 – мартенситного класса, диаметром  $D_1$ ; проволока 2 – аустенитного класса, диаметром  $D_2$ )

№ опыта	Марки напыляемых стальных проволок		Диаметр проволоки, мм		Соотношение диаметров проволок $D_1/D_2$	Содержание остаточного аустенита, об. %
	проволока № 1	проволока № 2	$D_1$	$D_2$		
1	20X13	12X18H9T	1,8	1,6	1,12	33
2	30X13	17X18H9	1,8	1,5	1,20	38
3	40X13	12X18H9T	1,8	1,6	1,12	40
4	40X13	17X18H9	1,8	1,5	1,20	42
5	30X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	40
6	30X13	12X18H12T	1,8	1,5	1,20	38
7	40X13	08X18H10T	2,0	1,8	1,11	43
8	<b>40X13</b>	<b>08X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>46</b>
9	<b>40X13</b>	<b>08X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>50</b>
10	40X13	08X18H10T	2,0	1,6	1,25	62
11	40X15H7Г7Ф2МС	12X25H16Т7	2,0	1,8	1,11	62
12	<b>40X15H7Г7Ф2МС</b>	<b>12X25H16Т7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>53</b>
13	<b>40X15H7Г7Ф2МС</b>	<b>12X25H16Т7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>58</b>
14	40X15H7Г7Ф2МС	12X25H16Т7	2,0	1,6	1,25	65
15	45X14H14B2M	12X18H10T	2,0	1,8	1,11	62
16	<b>45X14H14B2M</b>	<b>12X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>52</b>
17	<b>45X14H14B2M</b>	<b>12X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>56</b>
18	45X14H14B2M	12X18H10T	2,0	1,6	1,25	61
19	65X13	08X18H10T	2,0	1,8	1,11	63
20	<b>65X13</b>	<b>08X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>55</b>
21	<b>65X13</b>	<b>08X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>57</b>
22	65X13	08X18H10T	2,0	1,6	1,25	62
23	90X18МФ	12X18H12T	2,0	1,8	1,11	67
24	<b>90X18МФ</b>	<b>12X18H12T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>56</b>
25	<b>90X18МФ</b>	<b>12X18H12T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>60</b>
26	90X18МФ	12X18H12T	2,0	1,6	1,25	66
27	95X18	12X18H10T	2,0	1,8	1,11	63
28	<b>95X18</b>	<b>12X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>55</b>
29	<b>95X18</b>	<b>12X18H10T</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>58</b>
30	95X18	12X18H10T	2,0	1,6	1,25	65
31	110X18M	12X25H16Т7	2,0	1,8	1,11	65
32	<b>110X18M</b>	<b>12X25H16Т7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,12</b>	<b>57</b>
33	<b>110X18M</b>	<b>12X25H16Т7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,20</b>	<b>60</b>
34	110X18M	12X25H16Т7	2,0	1,6	1,25	65
35	90X18МФ	12X18H9T	1,8	1,6	1,12	62
36	110X18M	17X18H9T	1,8	1,5	1,20	68
Жирным шрифтом выделены результаты наиболее удачных опытов.						

Для восстановления штоков гидроцилиндров использовали установку гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10.

В качестве материала одной проволоки использовали высокохромистую сталь мартенситного класса марки 40X13 с содержанием углерода 0,42%, диаметром  $D_1 = 1,8$  мм.

В качестве материала другой проволоки использовали высокохромистую сталь аустенитного класса марки 12X18Н10Т с содержанием никеля 10%, диаметром  $D_2 = 1,6$  мм.

Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносили промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80.

После напыления покрытия и шлифования до окончательного размера (рисунок) на покрытие наносился слой модифицированной смазки Литол-24.



**Рисунок 1. – Восстановленные штоки  
после обработки**

Модифицирование осуществляли алмазно-графитовой шихтой ША-А (ТУ РБ 1000561180.003-2003), содержание которой составило 0,25 мас. %.

Приработку восстановленных штоков осуществляли при удельной нагрузке 40 МПа и скорости скольжения 0,25 м/с в течение 2 ч.

Испытания, проведенные в условиях подконтрольной эксплуатации при удельных нагрузках от 15 до 45 МПа, показали, что на поверхности штоков после 450...490 ч работы заметных следов изнашивания или коррозии не наблюдалось.

#### **Выводы**

Разработанная технология формирования комбинированных покрытий одновременным распылением проволок из сталей мартенситного и аустенитного классов методом гиперзвуковой металлизации с последующим трибомодифицированием может быть рекомендована для восстановления изношенных поверхностей деталей узлов трения скольжения, которые были покрыты гальваническим хромом.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Витязь, П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск : Белорус. наука, 2006. – 363 с.
2. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
3. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. – М. : Мир, 2000. – 518 с.
4. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.

5. Белый, А.В. Трибология: исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / А.В. Белый, К. Лудема, Н.К. Мышкин. – М. : Машиностроение ; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – 454 с.
6. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении : сб. науч. тр. (Минск, 30–31 окт. 2008 г.) ; редкол. : М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2008. – С. 479–484.
7. Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю.С. Коробов [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня : материалы 13-й междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2011. – Ч. 1. – С. 164–171.
8. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.
9. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия (РФ), 2008. – № 10. – С. 39–44.

Поступила 10.07.2017

#### RESTORATION OF SHAFTS BY COVERING WITH COMBINED COATINGS BY THE MEANS OF HYPERSONIC METALLIZATION

**M. BELOTSEKOVSKY, V. ZHORNIK, A. YALOVIK, A. DUDAN**

*The results of the research of shaft restoration by covering them with combined coatings by the means of hypersonic metallization are presented. Possible usage of hypersonic metallization of combined wear- and corrosion resistant surfaces, which consist of martensitic and austenitic classes of steel for restoration of worn chromium-plated shafts is shown. The technology of forming of combined coatings by simultaneous pulverization of metal wire from martensitic and austenitic classes of steel by the means of hypersonic metallization with following tribomodification is developed.*

**Keywords:** hypersonic metallization, chrome-plated shafts, restoration, combined coatings, tribomodified.