

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АКТИВИРОВАННЫМ
ДУГОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

**RESEARCH OF MATERIALS FOR THE RESTORATION
OF WEARIED SURFACES OF HIGHLY LOADED DETAILS
BY ACTIVATED ARC SPRAYING**

Ивашко В.С., д-р техн. наук, проф.,
Изоитко В.М., канд. техн. наук, доц.,
Буйкус К.В., канд. техн. наук, доц.,
Белорусский национальный технический университета,
г. Минск, Республика Беларусь

V. Ivashko, Doctor of technical Sciences, Professor,
V. Izoitko, Ph.D. in Engineering, Associate professor,
K. Buikus, Ph.D. in Engineering, Associate professor,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Рассмотрен процесс восстановления рабочих поверхностей трения коленчатых валов дизелей активированным дуговым напылением. Представлены результаты исследований триботехнических характеристик напыленных покрытий из проволочных материалов различного химического состава. Показано, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия, напыленные из проволоки, содержащей 0,8 % углерода, 16 % хрома, 4 % кремния, 3 % молибдена.

Ключевые слова: напыление, проволока, трибологические испытания, машина трения, коэффициент трения.

The process of restoring the working surfaces of friction of crankshafts of diesel engines by activated arc spraying is considered. The results of studies of the tribological characteristics of sprayed coatings of wire materials of different chemical composition are presented. It is shown that

the coatings sprayed from wire containing 0,8 % carbon, 16 % chromium, 4 % silicon, 3 % molybdenum have the highest antifriction properties.

Keywords: spraying, wire, tribological tests, friction machine, friction coefficient.

Введение

Нанесение защитных покрытий из проволочных материалов электродуговыми методами считается наиболее экономически эффективным методом восстановления деталей машин. По данным «Metallisation UK» дуговым напылением наносятся более 75 % металлических покрытий [1]. Использование тепла электрической дуги для плавления электродов позволяет внедрять этот энергосберегающий метод в условиях, как крупных ремонтных предприятий с массовым производством, так и небольших мастерских с единичным и уникальным производством. Освоение новых проволочных материалов, применяемых для сварочных работ, открывает возможность восстанавливать детали машин, работающих в условиях трения со смазкой, посадочных мест под подшипники качения, деталей, подвергающихся коррозионному и фреттинг-изнашиванию.

Плавление электродной проволоки открытой электрической дугой – высокотемпературным концентрированным источником нагрева – вызывает необходимость принимать меры по защите зоны плавления металла и расплавленных частиц от окисляющего воздействия кислорода воздуха. Использование инертных газов ввиду их большого (более 1,5 м/мин) расхода экономически нецелесообразно. Целесообразно связать кислород воздуха в реакции горения с углеводородным топливом. Жидкие топлива (керосин, бензин) применяются в некоторых устройствах для напыления покрытий. Высокотемпературная струя продуктов сгорания таких устройств содержит твердые частицы углерода, которые попадают на поверхность обрабатываемой детали и остаются там, ухудшая качество покрытий. Газообразное топливо для организации процесса горения подается через простейшие смесители-дозаторы, что позволяет значительно облегчить конструкцию металлизатора и оперативно изменять окислительно-восстановительные свойства распыляющей струи [2–4].

Широким распространением в ремонтном производстве метод активированного дугового напыления обязан доступности и сравнительно невысокой цене источника нагрева — электрической дуги. Для получения электрической дуги можно использовать серийные источники сварочного тока с жесткой вольтамперной характеристикой с диапазоном регулировки напряжения от 22 до 40 В и номинальным током более 500 А. Практически для распыления полнотельных стальных проволок диаметром до 2 мм достаточно иметь диапазон регулировки тока от 120 до 220 А. Запас по току необходим для обеспечения бесперебойного протекания переходных процессов.

Восстановления посадочных мест под подшипники качения производится хорошо зарекомендовавшими себя проволоками Св-08Г2С, 20Х13. Подшипники скольжения с удельными нагрузками до 7–8 МН/м² можно восстанавливать проволоками 40Х13, 38ХМЮА, что достаточно для большинства машин и механизмов, а также коленчатых валов бензиновых двигателей внутреннего сгорания.

Восстановление тяжело нагруженных (свыше 8 МН/м²) валов дизелей требует применения материалов, обладающих более высокими триботехническими свойствами. Такие материалы выпускаются рядом зарубежных фирм и применяются на предприятиях, имеющих электродуговые металлзаторы.

Цель работы — определение требований к свойствам наносимого материала для восстановления изношенных высоконагруженных поверхностей деталей на примере шеек коленчатых валов дизелей методом активированного дугового напыления.

1. Методика исследований

Образцы покрытий изготовлены следующим образом. На стальные ролики произведено напыление слоев проволоками различных составов. Для оценки пар трения были изготовлены «колодочки» из подшипникового сплава и бронзы СЗО и в лаборатории определены триботехнические свойства пар трения по следующим методикам.

Методика испытаний на сопротивляемость заеданию при скольжении. Оборудование - машина трения марки СМЦ-2. Схема испытания – ролик-колодочка. Приработка образцов – по специальному режиму до полного контакта всей поверхности трения колодочки.

Режимы испытания были выбраны следующие:

1. Нагрузка ступенчатая - через 10 кг при каждой нагрузке испытания велись в течение не менее 5 минут.

2. Скорость перемещения ролика относительно колодочки – 1,03 м/с.

3. Смазка М14ВЦ, капельная - одна капля в 15–20 с.

4. Ролики изготавливались из стали, на рабочую поверхность были напылены различные материалы с условными обозначениями: №№ 1, 2, 3, 4, 5. Примерный состав материалов приведен в таблице № 1. Для сравнения были изготовлены ролики из стали, которая применяется для коленчатых валов (ролик № 0). Наружный диаметр всех роликов составлял $40 \pm 0,02$ мм. Ширина роликов - $10 \pm 0,1$ мм. Механической обработкой наружного диаметра (шлифование и полирование) обеспечивали шероховатость $Ra = 0,30-0,20$ мкм.

Таблица 1 – Химический состав проволок

Образец	Примерный химический состав проволочных материалов						
	C	Cr	B	Si	Mn	Mo	W
0	0.38	1.3	0.3	0.27	0.55	0.25	-
1	0.45	5.5	-	0.6	1.6	0.6	-
2	4.4	23.5	-	1.5(V)	3.5(Nb)	6.5	2.2
3	0.18	13.0	-	0.3	1.2	1.5	0.25
4	0.8	16.0	3.5	4.0	-	3.0	-
5	0.40	13.0	0.6	0.8	0.8	-	-

5. Колодочки изготавливались из бронзы СЗО. Ширина колодочки $10 \pm 0,05$ мм. Поверхность трения составляла 100 мм^2 . Твердость Бр СЗО составляла НВ 42–45. Чистота поверхности трения колодочек $Rz = 12-15$ мкм. После приработки чистота поверхности трения составляла $Rz = 1-2,5$ мкм.

6. Испытания проводились при температуре окружающего воздуха $18-20$ °С.

7. Объем испытаний. Испытанию подвергалось шесть роликов в паре с бронзовыми колодочками. Каждый вариант испытывался трижды при ступенчатом давлении от 1,0 до $22,0 \text{ МН/м}^2$ с шагом $1,0 \text{ МН/м}^2$.

В процессе испытания велась запись момента трения, и проводилось наблюдение за появлением паров смазки и фиксирование нагрузки, при которой появляются пары смазки. Данная методика позволяет получать зависимость коэффициента трения от нагрузки.

По характеру этой зависимости можно определять при какой нагрузке (критическом давлении $P_{кр}$) происходит разрушение масляного слоя и начинается металлическое контактирование трущихся поверхностей со значительным выделением теплоты и образованием паров масла, схватыванием, заеданием или интенсивным изнашиванием трущихся поверхностей.

В результате получали зависимость момента трения $M_{тр}$ от давления P . Затем путем расчета определяли коэффициент трения, строили график зависимости коэффициента трения f от давления P .

После испытаний по определению критического давления перехода от смешанного трения к стабильному режиму нарушения сплошности масляного слоя $P_{кр}$ и коэффициент трения f , были проведены испытания на износ по второй методике.

Оборудование — машина трения марки СМЦ-2. Схема испытания: ролик – колодочка, приработка до 100 % контакта поверхности колодочки.

1. Давление – 10,0 МН/м².
2. Смазка капельная, масло – М14ВЦ
3. Скорость перемещения ролика относительно колодочки – 1,03 м/с.
4. Время испытания – 50 часов.
5. Измерение величины износа по потере массы роликов и колодочек за 50 ч.

6. Объем испытаний. Длительным испытаниям на износостойкость подвергались три вида роликов: № 0, № 3 и № 4. Эти ролики были выбраны по результатам испытаний по первой методике. Ролики № 3 были выбраны как показавшие неудовлетворительные свойства. Ролики № 4, как показавшие лучшие свойства. Ролики № 0, как материал достаточно хорошо известный, используемый для колленчатых валов. Нагрузка в 10 МН/м² была выбрана, как средняя нагрузка на вкладыши дизелей.

2. Результаты испытаний и обсуждение

На рисунке 1 представлена усредненная зависимость коэффициента трения f от давления P для каждого из трех образцов одного материала, нанесённого активированным дуговым напылением. Пред-

ставленные графики позволяют судить о средних значениях и стабильности триботехнических свойств каждой пары трения. У всех испытанных материалов зависимость f от P имеет общие явления закономерности:

1) В интервале малых значений давления P при его повышении коэффициент трения f снижается и достигает минимального значения 0,015–0,025. Это происходит за счет снижения толщины масляной пленки и снижения вязкости масла от повышения давления и температуры. Минимальный f соответствует граничному трению;

2) После достижения минимального значения f начинается медленный его рост, что связано с нарушением сплошности масляного слоя, с металлическим контактированием поверхностей трения и увеличением тепловыделения. Этот участок кривой соответствует режиму смешанного трения;

3) Медленный рост f при увеличении давления переходит в скачкообразный рост f до значения 0,05–0,07;

4) При достижении $f = 0,05$ тепловыделение от трения достигает значения, при котором начинается испарение смазки и кратковременное

схватывание отдельных участков поверхностей трения роликов и колодочек. Давление, при котором $f = 0,05$, является критическим $P_{кр}$;

5) При достижении значения $f = 0,06–0,07$ идет интенсивное окисление и износ поверхностей трения, а f остается стабильным или незначительно снижается при увеличении давления. Такое поведение пар трения объясняется изменением физико-химических свойств бронзы под воздействием температуры.

Отмеченные для всех пар трения явления, связанные с переходом от одного режима трения к другому, возникают у различных пар трения при разных давлениях P , что видно из полученных результатов (см. рисунок 1). Очень важным показателем, характеризующим пару трения, является критическое давление перехода от смешанного трения к режиму разрушения масляного слоя $P_{кр}$, при котором начинается заедание.

Пары трения, составленные из образцов, напыленные разными проволоками показали различные значения $P_{кр}$. Для удобства, анализа значений $P_{кр}$ сведены в таблице 2, значения которой показывают, что наиболее высокое и стабильное значение $P_{кр}$ имеет пара

«ролики №4 – БрСЗО». Для этой пары $P_{кр.ср} = 15,0 \text{ МН/м}^2$, второе значение $P_{кр.ср} = 13,3 \text{ МН/м}^2$ имеют пары «№ 2 + БрСЗО». Стабильность значения $P_{кр}$ у каждой пары получилась разная. Разница между $P_{кр.мин}$ и $P_{кр.макс}$ составляет разброс значений этого показателя. Минимальный он у роликов № 0, № 4, а максимальный у роликов № 2.

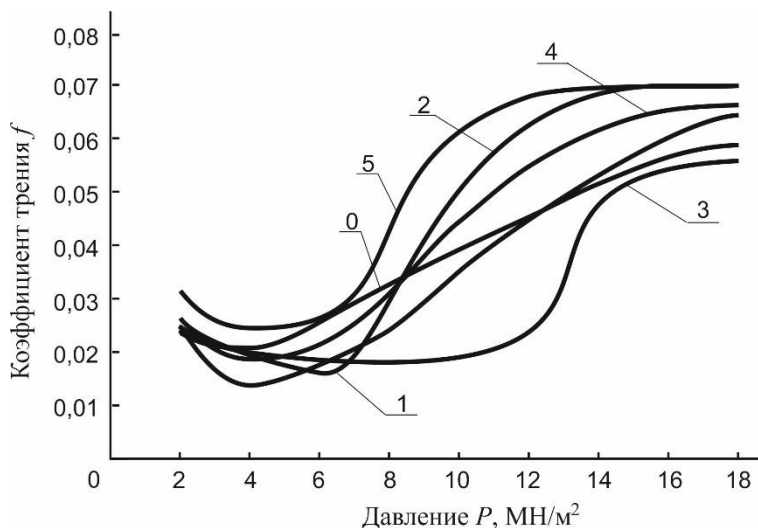


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения от давления (номера графиков совпадают с номерами образцов табл. 1)

В таблице 2 приведены также минимальные значения коэффициента трения и давление, при котором они получены, для каждой пары трения. Данный показатель характеризует фрикционные свойства пары трения в режиме граничного трения. Как видно, ролики №4 по этому показателю обладает некоторым преимуществом, его характеризует более высокое критическое давление перехода от смешанного трения к режиму устойчивого разрушения масляного слоя $P_{кр}$ при котором начинается заедание.

Оценка состояния поверхностей трения роликов и бронзовых колодочек после окончания испытаний, представленная в таблице 3, также характеризует триботехнические свойства, подтверждая результаты, полученные при испытании по методике 1.

Таблица 2 – Зависимость критического давления от химического состава

Ролик	Критическое давление $P_{кр}$, МН/м ²			Оценка результатов $P_{кр}$	Минимальное значение коэффициента трения
	минимальное	максимальное	среднее		
0	11,0	14,8	14,0	Высокое значение	0,018-0,020
1	8,3	11,2	10,7	Невысокое значение	0,019-0,020
2	10,0	16,0	13,1	Нестабильное значение	0,014-0,020
3	8,0	12,0	9,5	Самое низкое значение	0,019-0,020
4	13,3	17,0	15,0	Самое высокое и стабильное значение	0,015-0,017
5	8,0	11,5	10,2	Невысокое значение	0,019-0,024

Таблица 3 – Состояния поверхностей трения

Ролик	Состояние поверхности трения роликов при визуальном осмотре	Состояние поверхности трения бронзы Бр.СЗО	Оценка состояния поверхностей трения
0	Гладкая, без рисков, слабо окисленная	Гладкая, окисленная, износ равномерный	Удовлетворительно
1	Окисленная, покрыта рисками	Окисленная, покрыта рисками, изношена	Неудовлетворительно
2	Окисленная, покрыта мелкими рисками	Окисленная, гладкая, износ незначительный	Неудовлетворительно
3	Окисленная, с глубокими рисками	Окисленная, изношенная, много рисков	Неудовлетворительно
4	Гладкая, не окисленная	Не окисленная, гладкая, износ равномерный	Удовлетворительно
5	Окисленная, покрыта рисками	Окисленная, покрыта рисками	Неудовлетворительно

Представленные в таблице 4 результаты испытаний на износ показывают, что по износостойкости ролики № 4 и № 0 равнозначны, а ролики № 3 изнашиваются в 2 раза больше чем № 4 и № 0. Бронза СЗО имеет износ при испытании с роликами №3 в 3 раза больше, чем при испытании с роликами № 0 и в 2 раза больше, чем при испытании с роликами № 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний на износ

Наименование трущегося тела	Номер образца покрытия		
	0	3	4
	Износ, мм		
Контртело БрС30	0,18	0,4	0,2
Покрытие	0,03	0,06	0,02

Результаты проведенных исследований подтверждают предположение [5], что изнашивание напыленных стальных покрытий при высоких нагрузках будет идти менее интенсивно, чем цельносталльных поверхностей деталей. У последних после истирания и выноса из зоны трения оксидной пленки увеличивается склонность к схватыванию неокисленных сопрягаемых поверхностей и возрастает вероятность перехода к внутреннему трению, сопровождающемуся выкрашиванием глубинных блоков. У покрытий же после выработки очередного слоя открывается поверхность, в которой перемежаются участки чистого металла и пленки оксидов. Роль оксидов двоякая: с одной стороны, они играют роль сухой смазки и снижают коэффициент трения, с другой – охрупчивают и уменьшают прочность напыленного слоя. Применение плотной высокоскоростной газовой струи и восстановительной атмосферы при активированном дуговом напылении повышает дисперсность структуры, снижает количество оксидов, количество и величину пор в напыленном слое [6–11]. Поперечный размер микротрещин, образующихся под действием приложенной нагрузки, недостаточен для разрыва межзатомных связей на участках чистого металла; и они не вызывают разрушения покрытия в целом.

Заключение

1. Самыми высокими триботехническими свойствами из испытанных образцов обладают ролики № 4, которые по $P_{кр}$ превосходят стальные ролики, изготовленные из материала, применяющегося для изготовления коленчатых валов № 0.

2. Критическое давление перехода от смешанного трения к режиму разрушения масляного слоя $P_{крср}$ у образцов № 4 самое высокое и равняется $15,0 \text{ МН/м}^2$, что хорошо согласуется с результатами ра-

нее проведенных исследований [12, 13] по изучению влияния маслоудерживающей способности поверхности трения на её износостойкость.

3. Коэффициент трения, в режиме граничной смазки, у образцов № 4 равен 0,15–0,25, и имеет такое значение в широком интервале давлений 1,0–12 МН/м².

4. Износ роликов № 4 на 15 % меньше, чем стали (№ 0), износ бронзовых колодочек при этом незначительно выше, чем их износ при испытании со сталью.

5. При испытании роликов № 4 их поверхности трения и поверхности трения бронзы не имели окисления во всем диапазоне нагрузок (1,0–22,0 МН/м²).

6. Несколько худшие триботехнические свойства имеют образцы № 2, они также имеют большой разброс значений $P_{кр}$. Затем следуют ролик № 1, № 5, № 3. Нестабильные значения $P_{кр}$ у данного сплава видимо являются следствием различного нагрева частиц наполнителя, имеющего значительный разброс по величине. Этих недостатков лишен материал №4, в котором применен порошковый наполнитель стабильного гранулометрического состава.

Таким образом, проведенный анализ результатов исследования позволяют рекомендовать для восстановления изношенных поверхностей шеек коленчатых валов транспортных дизелей методом активированного дугового напыления состав материала порошковой проволоки, соответствующий образцам № 4 (0,8 % углерода, 16 % хрома, 4 % кремния, 3 % молибдена).

Литература

1. Ивашко, В.С. Активированная дуговая металлизация – перспективный способ нанесения износостойких покрытий на детали дорожно-строительных машин и коррозионностойких покрытий на элементы строительных металлоконструкций [Текст] / В.С. Ивашко, А.И. Шевцов, К.В. Буйкус // Известия Белорусской инженерной академии. – 1998. – № 2. – С. 14–16.

2. Ивашко В. С., Восстановление деталей узлов трения активированной дуговой металлизацией [Текст] / В.С. Ивашко, М.А. Белоцерковский, К.В. Буйкус // Автоматическая сварка. – 1999. – № 4. – С. 38–40.

3. Ивашко, В. С. Восстановление деталей нанесение покрытий электродуговым напылением [Текст] / В.С. Ивашко, К.В. Буйкус, С.С. Шамович // Материалы междунар. научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», 28–30 мая 2002 г., г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2002. – С. 61–63.

4. Ивашко, В. С. Современные способы нанесения покрытий на изношенные поверхности деталей типа «круглые стержни» [Текст] / В.С. Ивашко, К.В. Буйкус, А.С. Савич // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : доклады республиканской научно-практической конференции на 20-й Международной специализированной выставке «Белагро-2010», г Минск, 10 июня 2010 г. – Минск, 2011. – С. 130–138.

5. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] / В.В. Кудинов, В.М. Иванов. – М. : Машиностроение, 1981. – 192 с.

6. Структура и свойства стальных покрытий, нанесенных методом активированной дуговой металлизации [Текст] / Ю.С. Коробов [и др.] // Сварочное производство. – 1997. – №1. – С. 4–6.

7. Триботехнические исследования покрытий для восстановления деталей автотракторной техники [Текст] / В.С. Ивашко [и др.] // Инженерия поверхности и реновации изделий: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 04–08 июня 2012 г., г. Ялта-Киев, 2012 г. – Киев: АТМ Украины. – 2012. – С.118–120.

8. Ивашко, В. С. Физико-механические свойства напыленных покрытий [Текст] / В.С. Ивашко, В.Г. Жданко, К.В. Буйкус // Материалы 9-ого международного научно-технического семинара «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте», 23–27.02.2009 г., г. Свалява, Карпаты. – Киев : АТМ Украины.– С. 103–107.

9. Ивашко, В. С. Повышение физико-химических свойств газотермических покрытий на рабочих поверхностях деталей автомобилей [Текст] / В.С. Ивашко, К.В. Буйкус // Материалы X Международной научно-технической конференции «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» – Винница, 2017. – С. 57–60.

10. Ивашко, В. С. Повышение физико-механических свойств газотермически напыленных покрытий механической активацией

[Текст] / В.С. Ивашко, К.В. Буйкус // Материалы 15-й международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» / в 4-х томах. Том 2. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 117.

11. Ивашко, В. С. Исследование материалов для восстановления шеек валов активированным электродуговым напылением / В.С. Ивашко, К.В. Буйкус // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов. Безопасность дорожного движения // Сборник научных трудов по результатам Международной научно-практической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 486–490.

12. Роль адгезии смазочного масла при граничной смазке [Текст] / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Трение и износ. – 1998. – Т. 19. – № 3. – С. 23–25.

13. Анализ корреляции между маслоудерживающей способностью и износостойкостью напыленных защитных покрытий [Текст] / А. С. Никитина [и др.] // Республиканский межведомственный сборник «Сварка и родственные технологии». —Минск, 2000. – Вып. 3. – С. 85–87.