

УДК 629.114.2-235

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-10-13

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

**К РАЗРАБОТКЕ И ИССЛЕДОВАНИЮ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ
ПОРОШКОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
ИЗ СТАЛИ 40X13 ДЛЯ РАБОТЫ В МАСЛЯНОЙ СРЕДЕ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: fotina-sk@mail.ru, kvi_au@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки и исследования свойств фрикционных покрытий из стали 40X13, изготовленных по высокопроизводительной технологии плазменного напыления, для работы по стали с высоким коэффициентом трения в масляной среде.

Ключевые слова: граничное трение, полусухое трение, пара трения, коэффициент трения, пористость фрикционного покрытия, скорость скольжения, удельная нагрузка

© Крыхтин Ю. И., Карлов В. И., 2025.

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

**TO DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PROPERTIES
OF POROUS POWDER PLASMA FRICTION ROOFING MADE
OF STEEL 40X13 FOR OPERATION IN OIL ENVIRONMENT**

Volgograd State Technical University

The article discusses the development and study of the properties of friction coatings made of 40X13 steel made using the plasma sputtering technology for work in tandem with steel with a high coefficient of friction in an oil medium.

Keywords: boundary friction, semi-dry friction, friction pair, friction coefficient, friction coating porosity, sliding speed, specific load

В транспортном машиностроении для колесных и гусеничных машин актуальными являются вопросы создания малогабаритных, высокоэффективных фрикционных устройств с материалами трения в конусе синхронизатора и дисках трения коробки переключения передач с высоким коэффициентом трения и износостойкостью, работающими по стали в масляной среде и производимыми по высокопроизводительной технологии [1–3].

Целью работы является разработка и исследование свойств высокоэффективных пористых порошковых фрикционных стальных покрытий для работы по стали в масляной среде с высоким коэффициентом трения.

Новизной работы являются полученное плазменным напылением пористое порошковое фрикционное покрытие из стали 40X13 и результаты его исследования по коэффициенту трения и износостойкости при взаимодействии со стальным контртелом в масляной среде.

Для достижения высоких эксплуатационных свойств деталей трения целесообразно с экономической и технической точек зрения фрикционные покрытия наносить на стальную основу. Одним из наиболее перспективных методов формирования покрытий является метод плазменного напыления, который позволяет получать различные по составу пористые покрытия толщиной до 1 мм, прочно связанные с основным металлом [3].

Перед покрытием поверхность основы из стали 12ХН3А (для конуса синхронизатора КПП) и стали 65Г (для фрикционных дисков) обезжиривается, подвергается дробеструйной обработке и затем напыляется фрикционный материал. Напыление покрытий из стали 40X13 производится на универсальной плазменной установке УПУ-3М с помощью дуговой плазмы исходными материалами в виде проволоки или порошка [4] на следующих режимах: сила тока $I = 450\text{--}500$ А; напряжение $U = 30\text{--}32$ В; дистанция напыления $L = 90\text{--}110$ мм; расход плазмообразующего газа $Q = 26\text{--}28$ л/мин. Произ-

водительность процесса напыления 10,2 кг/ч порошковой проволоки при расходе ее на один диск или конус синхронизатора КПП 0,148 кг. Покрытие следует наносить в виде расплавленных частиц со средним размером 70 мкм со скоростью до 100 м/с. Структура покрытия из стали 40X13 при газотермическом напылении претерпевает фазовое превращение и представляет собой троостит и мартенсит. При этом число микротвердости H_n покрытия составляет 65–75 МПа; прочность сцепления с основой, измеренная по штифтовой методике составляет 40–50 МПа; остаточная пористость – 18–20 %.

Триботехнические свойства покрытий определялись на машине трения МТ-68М без съема образца в ходе автоматических замеров и записи износа (с точностью до 1 мкм), силы трения и средней температуры образца [4]. Контртела изготавливались из стали 20Х2Н4А ГОСТ 4543–81 с твердостью $\geq 58\text{HRC}_3$ (сердцевина 36,5–49,5 HRC_3), актуальной для конуса синхронизатора. Поверхность контртел цементировалась на глубину 1–1,4 мм и закаливалась. Испытания проводили при скоростях скольжения 1, 3, 6 и 9 м/с с полустерной смазкой трансмиссионным маслом МТ-16П в условиях граничного и полусухого трения. Под граничным трением понимают контакт между поверхностями с крайне тонкой разделительной пленкой смазки, а полусухое трение – это сочетание граничного трения с очагами сухого трения [4]. Сначала определялась нагрузка схватывания поверхностей в момент появления полусухого трения (предельное давление), приведенная в табл. 1.

Таблица 1

**Нагрузка схватывания поверхностей
трения, МПа**

Марка материала трения	Скорость скольжения, м/с			
	1	3	6	9
40X13 (покрытие)	12	8	6,5	5
40X13 (литая)	8	5	4	3

Затем определялись основные триботехнические свойства материалов трения соответственно для скоростей скольжения 1, 3, 6, 9 м/с

в режиме граничного трения, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения триботехнических свойств

Марка материала и условия трения	Время приработки, мин	Темп изнашивания, мкм/км	Коэффициент трения μ
40X13 (покрытие)	30; 25; 25; 20	0,42; 0,39; 0,32; 0,5	0,16; 0,17; 0,17; 0,16
Сталь 40X13 (литая)	40; 35; 30; 30	0,63; 0,72; 0,61; 0,74	0,13; 0,13; 0,12; 0,12

Пористые покрытия из стали 40X13 превосходят литой фрикционный материал 40X13 по износостойкости в 1,65 раза при меньшем износе контртел, по коэффициенту трения – в 1,32 раза, а также имеют повышенную стойкость против схватывания.

При деформации и уплотнении податливого упругого пористого фрикционного покрытия детали при работе в масляной среде имеют место режимы граничного и полусухого трения с существенным повышением коэффициента трения μ . При скольжении поверхностей пары трения с пористым фрикционным увеличивающим маслосъемность сопряжения покрытием покрытие способно под действием повышенных нагрузок деформироваться и уплотняться по глубине без полного выдавливания смазки из зоны трения в локальных объемах с выделением дополнительной смазки, что в значительной степени уменьшает возможность схватывания на этих участках поверхностей трения и, следовательно, предотвращает распространение процессов схватывания на всю поверхность трения. При этом предотвращается переход к сухому трению при сохранении повышенного коэффициента трения, характерного для полусухого режима и снижа-

ется (по сравнению с сухим трением) износ сопряженных поверхностей, что значительно увеличивает долговечность фрикционного узла.

Нижний предел по пористости 10 % устанавливается исходя из условий обеспечения деформирования пористого тела и накопления масла в порах. Верхний предел пористости 25 % устанавливается из условий обеспечения прочностных свойств покрытия.

Проведены статистические испытания для создания базы экспериментальных данных по $\mu_1 = f(V_{ск}, p)$ при неизменной пористости фрикционного материала.

Результаты триботехнических испытаний в минеральном масле марки ТСЗП-8 ОСТ 38.01365–84, подаваемого в зону контакта капельным или фитильным способом для обеспечения условий граничного трения, на машине трения МТ-68 пористого порошкового фрикционного материала из стали 40X13 с пористостью $\Pi=19\%$, получаемого методом плазменного напыления, представлены в табл. 3. Величина удельной нагрузки для испытания пары трения выбиралась равной 80 % от нагрузки схватывания пары трения сталь 65 Г – сталь 65 Г, которая была выбрана, как базовая.

Таблица 3

Результаты триботехнических испытаний

Условия трения	Граничное трение			Полусухое трение	
$V_{ск}$, м/с	5	10	20	25	30
p , МПа	6	4	2	1	0,5
Темп износа, мкм/км	< 5	< 5	5	< 5	10
Температура в зоне контакта, °С	76	90	125	144	154
μ_1	0,1	0,12	0,2	0,32	0,4

Проведены статистические испытания для создания базы экспериментальных данных по $\mu_2 = f(V_{ск}, p, \Pi)$ для определения коэффициента

трения для пары трения в зависимости от пористости материала трения.

Испытания на трение и изнашивание плаз-

менных покрытий из стали 40Х13, представляющих собой пористый материал с гетерогенной структурой, состоящей из частиц троостита, мартенсита и сорбита заковки, проведены на машине трения МТ-66 на скорости скольжения $V_{ск} = 6$ м/с в режимах граничного и полусухого трения со смазкой МТ-16П ГОСТ 6330–58.

В качестве контртела использовалась закаленная сталь 20Х2Н4А ГОСТ 4543–81 с твердостью ≥ 58 HRC_Э. Для сравнения наряду с покрытиями испытаниям подвергались образцы из стали 12ХН3А ГОСТ 4543–61.

Результаты испытаний покрытий приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на трение и износ

№	П, %	Предельная нагрузка схватывания, МПа	Темп износа, мкм/км*	Коэффициент трения μ_2 в период установившегося износа
1	5–7	4,8	0,44	0,17
2	10–12	5,9	0,23	0,14
3	17–19	6,1	0,22	0,12
4	22–25	6,0	0,23	0,12
5	28–32	5,0 (механическое разрушение)	–	–
6	0 (сталь 12ХН3А)	4,2	0,58	0,2

* – Износостойкость покрытий определяли при нагрузке 3,5 МПа, т. е. при нагрузке на 15 % меньшей от нагрузки схватывания стали 12ХН3А

Максимальной нагрузкой схватывания обладают покрытия с $P=10-25$ %. Значительно уступают им покрытия с $P=5-7$ % и сталь 12ХН3А. Высокопористые покрытия, имеющие недостаточную прочность, механически разрушаются при достижении нагрузок 5 МПа.

В результате проведенных испытаний установлено, что, во-первых, плазменные покрытия из стали 40Х13 с пористостью 10–25 % способны работать при нагрузке в 1,4–1,5 раза превышающей максимальные нагрузки для стали 12ХН3А. Во-вторых, плазменные покрытия из стали 40Х13 с пористостью 10–25 % превосходят по износостойкости сталь 12ХН3А.

Пробеговые испытания в объеме 10000 км опытных конусов синхронизаторов коробки перемены передач с покрытием из стали 40Х13 на легких гусеничных машинах с большой удельной мощностью подтвердили выявленные на машинах трения преимущества изделий с покрытием по триботехническим и эксплуатационным характеристикам в сравнении с серийными конструкциями. В том числе, износ покрытия на конусе синхронизатора составил 0,25 м, а для серийной детали – 0,45 мм.

Плазменные фрикционные покрытия с коэффициентом трения $\mu \geq 0,16$ при работе со стальным контртелом в масле используется с целью повышения характеристик дисков фрик-

ционных устройств и конусов инерционных синхронизаторов трансмиссий легких транспортных гусеничных машин (ГМ) с большой удельной мощностью (свыше 30 л.с./Т) [5].

По результатам исследования при создании новых и модернизации существующих трансмиссий легких транспортных ГМ рекомендуются газотермические покрытия из стали 40Х13 с пористостью 10–25 % для проектирования высокоэффективных фрикционных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Труханов, В. М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов. – М. : Машиностроение, 2001. – 736 с.
2. Шаповалов, В. В. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения / В. В. Шаповалов, А. Сладковски, А. Ч. Эркенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 1. – С. 64–75.
3. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 239 с.
4. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия, материалы, технологии, свойства, области применения. Справочник / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысельский. – Киев : Наукова думка, 1985. – 623 с.
5. К разработке высокоэффективных пористых порошковых фрикционных покрытий для работы в масле / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (279) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 24–27. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-8-279-24-27.