

УДК 621.822.572

А.С. Аралкин, К.А. Аралкина

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Изложены результаты теоретических исследований по обоснованию массы наносимого полимера на плазменный металлоидный слой комбинированного металлополимерного износостойкого покрытия. Приведены результаты исследований внутренней микроструктуры покрытия и параметров неровностей его поверхности. Дана количественная оценка абразивных и фрикционных свойств защитного покрытия при его работе в паре трения с резиной

Ключевые слова: металлополимерное покрытие, жидкотекучесть, конвейерный ролик, металлоидное напыление, полиуретановый лак.

Рбота промышленного оборудования, связанная с передачей движения трением деталям из резины, сопровождается интенсивным абразивным и гидроабразивным износом рабочих поверхностей, которые работают в паре трения с резиновыми поверхностями. К таким деталям можно отнести шкивы ременных передач, корпуса конвейерных роликов (особенно на холостой загрязненной ветви ленты конвейера), приводные и отклоняющие барабаны ленточных конвейеров и пр. При этом интенсивность износа поверхностей этих деталей такова, что при их полном разрушении остальные элементы конструкции (подшипники, их корпуса, оси и др.) находятся в работоспособном состоянии. Кроме того, относительное проскальзывание в рассматриваемых парах трения пагубно влияет не только на их долговечность, но и на рабочие показатели машин. Так, например, проскальзывание приводных ремней (плоских или клиновых) на металлорежущих станках приводит не только к потерям мощности, но и изменению фактической рабочей скорости шпинделя.

Поэтому разработка и исследование свойств нового защитного износостойкого покрытия, которое обладает хорошими фрикционными свойствами и не разрушает контактирующие с ними резиновые поверхности, является задачей своевременной и актуальной.

В Криворожском техническом университете разработан новый способ нанесения комбинированного металлополимерного покрытия, который может быть использован во всех отраслях промышленности для нанесения износостойких покрытий на поверхности деталей, передающих движение трением [1]. Способ включает нанесение металлического подслоя методом плазменного напыления и последующее нанесение полимерной полиуретановой композиции. При таком способе нанесения защитного покрытия полимер покрывает выступы и впадины напыленного твердосплавного металлического покрытия с сохранением волнистости поверхности. Это позволяет обеспечить сцепление взаимодействующих трущихся пар при передаче движе-

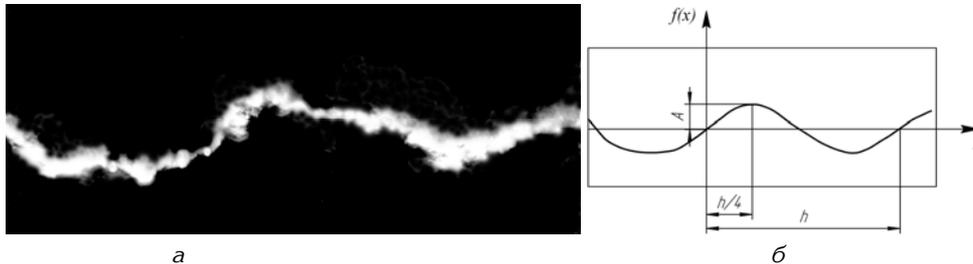


Рис. 1. К вопросу определения параметров напыленной поверхности: а — характер поверхности, определенный при помощи микроскопа МИС — 11; б — аппроксимированная кривая сечения поверхности

ния трением и повысить их долговечность.

Полиуретановая полимерная композиция имеет хорошую жидкотекучесть, водостойкость, термостойкость и проникающую способность, что позволяет получить высокую сплошность покрытия, обладающего быстрым отверждением, высыханием и обеспечивающего высокую адгезию к металлической подложке. Эксплуатационные и защитные свойства достигаются при однослойном нанесении.

Цель работы — оценка практической применимости нового защитного износостойкого покрытия металлических поверхностей, работающих в паре трения с резиной.

Задачи работы: теоретическое обоснование массы полимера, наносимого на плазменный металлоидный слой покрытия, и разработка рекомендаций для инженерных расчетов при разработке технологии его нанесения; исследование микроструктуры защитного слоя и оценка параметров микронеровностей его поверхности для подтверждения гидроабразивной износостойкости предлагаемого покрытия; исследование и сравнительная оценка износостойких и абразивных свойств покрытия относительно конструкционных сталей.

Идея работы состоит в том, чтобы полимерную композицию наносить нормировано, таким образом, при ко-

тором тонкий слой полимера покрывал бы все неровности, сглаживая абразивную поверхность металлоидного защитного слоя покрытия с сохранением ее волнистости. Для этого экспериментально определяют удельный расход полимера при однослойном покрытии гладкой поверхности, измеряют высоту и шаг микронеровностей металлоидного защитного слоя, а массу наносимого полимера определяют по формуле, кг

$$Q = qS\lambda^2,$$

где q — удельный расход полимера, наносимого на гладкую ровную поверхность, кг/м². Для полиуретанового лака $q=0,15$ кг/м²; S — площадь напыляемой поверхности, определяемая по линейным размерам поверхности детали, м², λ — коэффициент, учитывающий увеличение линейных размеров поверхности за счет высоты и шага микронеровностей.

Величину коэффициента λ определяли из допущения, что форма микронеровностей плазменного слоя покрытия в поперечном сечении может быть аппроксимирована синусоидальной кривой вида $y = A \cdot \sin \varphi$ (A — амплитуда микронеровностей, мм; φ — угловая координата, рад), рис. 1.

Представив угловую координату φ в виде переменной x , а шаг микронеровностей h в виде периода колеба-

ний 2π получим уравнение микронеровностей плазменного слоя в его поперечном сечении $y=A \cdot \sin(2\pi/h) \cdot x$.

Используя известное соотношение для определения длины дуги плоской кривой [2], можно рассчитать длину дуги, описывающей микронеровности напыленного слоя

$$L_k = 4 \int_0^{h/4} \sqrt{1 + \left(A \frac{2\pi}{h}\right)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{h} x\right)} dx. \quad (1)$$

Сделав замену в (1) $\frac{2\pi}{h} x = t$, а также полагая, что $\lambda = L_k/h$, получили соотношение для определения коэффициента, учитывающего увеличение размеров поверхности, покрываемой полиуретаном

$$\lambda = 2/\pi \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 + \left(A \frac{2\pi}{h}\right)^2 \cos^2 t} \cdot dt. \quad (2)$$

Для упрощения практических расчетов разработаны табличные значения коэффициента λ , как функция величин h и A , мкм:

Предложенное покрытие исследовали в лабораторных условиях, в ходе которых изучали микроструктуру металлополимерного покрытия, определяли параметры волнистости его поверхности — шаг и высоту неровностей, а так же абразивные свойства защитного покрытия. Данные по параметрам неровностей сравнивали с результатами их измерений на поверхности металлоидного слоя без нанесенного полимера. Износостойкость и абразивные свойства покрытия исследовали на машине трения СМЦ-2 с образцами Ш40 мм, толщиной 10 мм. Коэффициент трения металлополимерного покрытия по отношению к резине определяли при помощи моментоизмерителя этой же машины трения. Исследования проводили при отно-

сительном скольжении образцов 15 и 20 %. Момент трения определяли по трем измеренным значениям для каждой из нагрузок в парах трения 50, 100 и 150 Н.

Металлоидное напыление поверхности образцов выполняли на плазменной установке УН-115 твердосплавными порошками двух видов — ПГ-НЗ и ПГСР. Полимерное покрытие — полиуретановый лак на основе промышленного полиизоцианата нанесли методом распыления. Пару трения с испытуемым образцом при исследовании абразивных свойств покрытия изготавливали из резины толщиной 12 мм. Абразивную пару трения с такими же размерами изготавливали из резинового диска с наполнителем из электрокорунда для определения износостойкости защитного покрытия. Величину износа защитного покрытия определяли весовым методом. Результаты исследований сравнивали с данными, полученными для гладких образцов Ш40 мм, толщиной 10 мм из Стали 20, ГОСТ 1050—74. Микроструктуру нового металлополимерного покрытия исследовали на металлографических микроскопах МИМ-3 и МИМ-8М на аншлифах в сплаве Вуда, а характер и параметры микронеровностей оценивали на микроскопе Линника МИС-11.

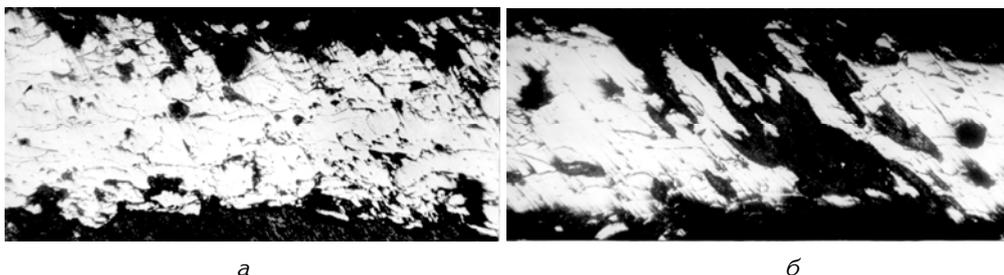
Исследования внутренней микроструктуры напыленного металлоидного слоя без полимерного покрытия показали, что структура пористая (рис 2). Причем замкнутые поры (рис. 2, а) равномерно распределены по всему сечению наплавленного слоя.

Имеются сквозные поры, проникающие к напыляемой поверхности (рис. 2, б). Очевидно, что пористость исследуемого напыленного слоя будет способствовать задержке

Таблица 1

Численные значения коэффициента λ

$h \backslash A$	10	15	20	25	30	35
50	1,349	1,657	2,001	2,365	2,742	3,126
100	1,112	1,218	1,349	1,497	1,657	1,826
150	1,060	1,112	1,179	1,259	1,335	1,446
200	1,041	1,071	1,112	1,161	1,218	1,281
250	1,032	1,052	1,079	1,112	1,151	1,194



а

б

Рис. 2. Внутренняя микроструктура наплавленного металлоидного слоя без полимера: а — структура с замкнутыми порами, б — со сквозными порами

в нем влаги, а сквозные поры — проникновению ее на защищаемую поверхность детали. Это будет приводить к интенсивной электрохимической коррозии металла. Рваная поверхность напыленного металлоидного слоя твердосплавного порошка придает ей ярко выраженные абразивные свойства. Поэтому нанесение полимерного слоя на поверхность металлоидного слоя покрытия необходимо для устранения его абразивности и защиты от коррозии.

Установлено, что после нормированного нанесения полиуретанового слоя все абразивные выступы металлоидного плазменного слоя сглаживаются (рис. 3). Среднее значение высоты и шага микронеровностей напыленной поверхности до нанесения полимерного слоя составляет, соответственно, — 44, 0 и 145 мкм. Полимерное покрытие приводит к незначительному изменению средней высоты неровностей (43...45 мкм) и в

3,5...3,7 раза увеличивает их шаг (500...513 мкм) за счет покрытия мелких неровностей.

Толщину полимерного слоя измеряли на двух образцах. Выполняли по семь измерений. Установлено, что средняя толщина измеряемого слоя на образцах соответственно составила: на впадинах 68 и 79 мкм, а на возвышенностях — 42 и 21 мкм. Огленных участков металлоидного слоя покрытия не наблюдали.

Исследования износостойкости предлагаемого металлополимерного покрытия проводили при номинальной частоте вращения образцов 300 об/мин, их относительном скольжении 20 % и усилии прижатия трущихся поверхностей 80 Н (рис. 4). Установлено, что интенсивность износа защитного покрытия резко снижается в течение 15...20 мин работы сопряженных пар. Это происходит за счет износа резко выступающих неровностей его поверхности (рис. 4, б

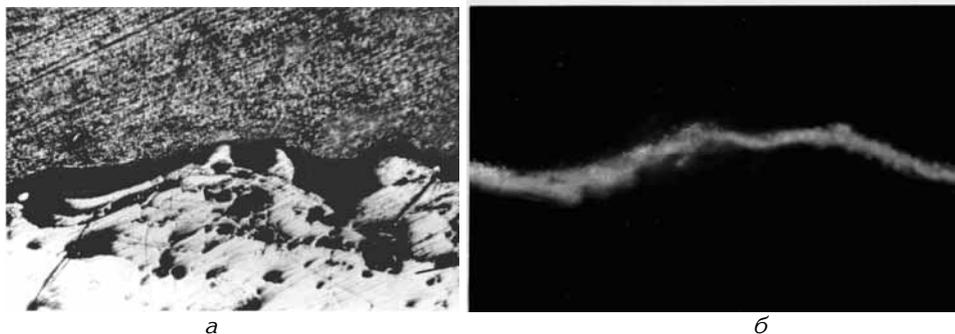


Рис. 3. Микроструктура металлополимерного покрытия в сплаве Вуда (а) и характер микронеровностей поверхности (б)

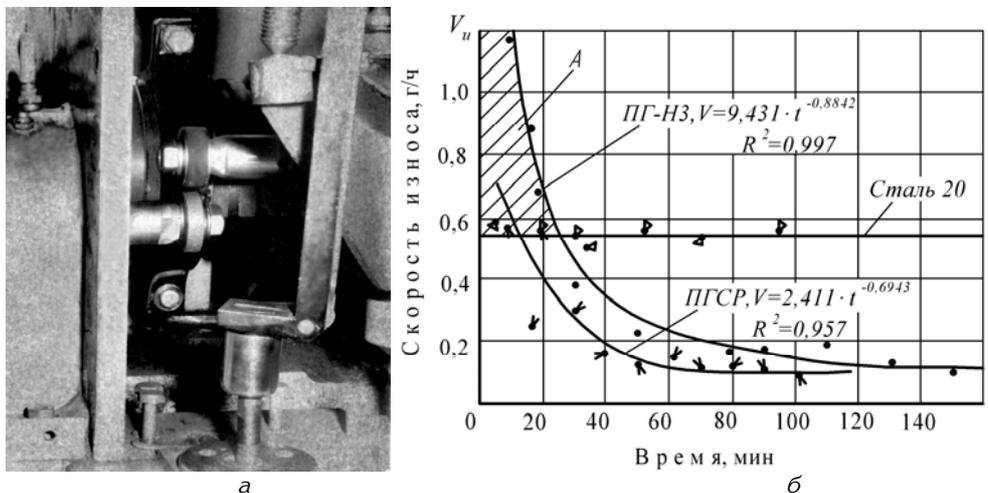


Рис. 4. Исследование эксплуатационных свойств металлополимерного покрытия на машине трения СМЦ-2: а — установка образцов на машине, б — зависимости интенсивности износа образцов

— зона А притирки образцов заштрихована).

Через 50...80 мин после работы пар трения скорость износа металлополимерного защитного покрытия с твердосплавным порошком ПГ-НЗ в 3...4,5 раза, а покрытия с порошком ПГСР в 3,6...3,8 раза ниже, чем Сталь 20. Кроме этого исследовали покрытие с твердосплавным порошком ПГ10-Н04, которое имеет слабо выраженные износостойкие свойства и рекомендуется преимущественно для повышения гидроабразивной износостойкости поверхностей деталей машин.

В основу методики экспериментальных исследований абразивных свойств покрытия положены математические методы планирования экспериментов с применением методов статистики [3, 4]. В качестве функции отклика принят абразивный износ резинового образца из обкладки конвейерной ленты, работающей в паре со стальным образцом, на рабочую поверхность которого нанесено металлополимерное защитное покрытие.

Исследуемые факторы: усилие прижатия образцов P , H , установли-

вали, исходя из реальных нагрузок на конвейерные ролики со стороны ленты холостой ветви конвейера. Минимальное значение этого усилия в расчете на 1 см длины рассчитывали по формуле, Н.

$$P = q_n \cdot l_p \cdot n_p^{-1} l_p^{-1}, \quad (3)$$

где q_n — линейная сила тяжести конвейерной ленты, принимали $q_n = 1 \cdot 10^3 \dots 1,6 \cdot 10^3$ Н/м; l_p — шаг установки конвейерных роликов на холостой ветви ленты конвейера; n_p — количество роликов на холостой ветви ленты; $l_p = 0,105$ м — длина ролика.

Предельное максимальное значение этого фактора устанавливали с учетом возможных динамических нагрузок на конвейерный ролик со стороны ленты, а также нагрузок, вызванных её перегибами. Пределы варьирования усилия прижатия образцов P , Н, включенные в план эксперимента: верхний уровень — 140; основной — 80; нижний — 20.

При составлении плана эксперимента осуществляли переход от натуральных переменных к кодированным по формуле

$$x_i = (X_i - X_i^0) / h_i,$$

где X_i — натуральное значение фактора, X_i^0 — основной уровень фактора, h_i — шаг варьирования, x_i — кодированное значение фактора (-1; 0; +1). Кодовое обозначение усилия прижатия образцов — $x_1 = (P - 80) / 60$.

Относительное скольжение образцов ξ устанавливали исходя из необходимости получения более полной картины износа резинового образца с учетом технических возможностей машины трения СМЦ-2. Пределы варьирования относительного скольжения образцов: верхний уровень — 0,20; основной — 0,15; нижний —

0,10. Кодированное обозначение относительного скольжения образцов — $x_2 = (\xi - 0,015) / 0,05$. Количество параллельных замеров в каждой точке эксперимента, рассчитанное по соотношениям математической статистики, принято равным 3.

Учитывая, что перед началом экспериментальных исследований отсутствовала априорная информация о характере зависимости износа резинового образца от исследуемых факторов, планирование эксперимента осуществляли по плану Вестлейка второго порядка, минуя планирование первого порядка. Данные эксперимента обрабатывали по известным соотношениям математической статистики [3, 4].

Уравнения регрессии износа строили в виде

$$U = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_{212} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2, \quad (4)$$

где b_0 , — свободный член; $b_i, b_{ij} (i, j = 1, 2 \dots k; i \neq j), b_{ii}$ — коэффициенты регрессии, k — порядковый номер фактора.

Полученные численные значения коэффициентов регрессии в (4) проверяли на значимость по t — критерию Стьюдента. Адекватность уравнения оценивали по критерию Фишера. Данные эксперимента обрабатывали на ЭЦВМ «ЕС-1061», анализировали полученные соотношения.

Результаты проверки полученных коэффициентов регрессии на значимость и ошибки эксперимента приведены в табл. 2. Анализ данных показывает, что коэффициенты регрессии b_2 и b_{22} в уравнении регрессии износа незначимы.

Поэтому уравнение регрессии после проверки коэффициентов регрессии на значимость в кодированных переменных имеют вид

Таблица 2

Таблица регрессионного анализа

Коэффициент регрессии		$t_{\text{выч}}$	$\sigma\{y\}$	Табличный критерий, ($q=5\%$)
b_0	2,54	22,3	0,114	$t_{\text{табл}} = 2,1$
b_1	1,95	31,2	0,063	
b_2	0,95	15,2		
b_{12}	0,14	1,81	0,077	
b_{11}	0,44	4,07	0,108	
b_{22}	0,01	-0,09		
$\sigma_{LF}^2\{y\} = 0,31$; $\sigma^2\{U\} = 0,07$; $F_{\text{выч}} = 4,46$				$F_{\text{табл}} = 8,57$

$$U = 2,54 + 1,95x_1 + 0,95x_2 + 0,44x_1^2, \quad (5)$$

в натуральных переменных:

$$U = -2,14 + 0,13 \cdot 10^{-1} \cdot P + 19 \zeta + 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot P^2. \quad (6)$$

Из анализа результатов вычислений по проверке адекватности полученного соотношения по критерию Фишера (см. табл. 2) следует, что уравнения регрессии (6), (7) хорошо описывают экспериментальные данные ($F_{\text{выч}} < F_{\text{табл}}$).

Установлено (5), что преимущественное влияние на абразивный износ резины, находящейся в паре трения с металлополимерным покрытием, имеет усилие их прижатия (коэффициент при x_1 - максимальный). Относительное скольжение исследуемых пар трения оказывает существенное влияние на износ резинового образца, но влияние этого фактора вдвое меньше, чем усилие прижатия трущихся поверхностей. Усилие прижатия резинового образца к поверхности металлополимерного покрытия влияет на износ резины независимо от относительного скольжения образцов (коэффициент регрессии при $x_1 \cdot x_2$ - статистически незначим).

В ходе экспериментальных исследований фрикционных свойств ме-

таллополимерного покрытия проводили сравнительную оценку коэффициента трения по отношению к резине образцов с гладкой поверхностью ($R_a 6,3$) из Стали 20. Установлено, что коэффициент трения образцов с новым защитным покрытием при относительном скольжении 15 и 20 % составляет $f_{\text{тр1}} = 0,243$ и $f_{\text{тр2}} = 0,43$. Статистическая ошибка в определении этих значений, соответственно, $\sigma^2\{f_{\text{тр1}}\} = 0,011$ и $\sigma^2\{f_{\text{тр2}}\} = 0,0012$. Коэффициент трения по резине образцов без покрытия для принятого скольжения в 2,36...2,11 раза ниже, чем образцов с металлополимерным покрытием, и соответственно составляет $f_1 = 0,103$ и $f_2 = 0,204$ ($\sigma^2\{f_1\} = 0,0009$ и $\sigma^2\{f_2\} = 0,0003$). Увеличение относительного скольжения трущихся поверхностей приводит к увеличению коэффициента трения. Полученные результаты и заключение подтверждаются соотношением Г.М. Бартенова, рекомендуемым для оценки значений коэффициента трения применительно к резине [5]

$$f = E_{\infty} \cdot A^{-1} (E_{\infty} + \alpha \cdot q)^{-1}, \quad (7)$$

где E_{∞} — равновесный модуль упругости резины; $A = 1/c \cdot a$ — константа, зависящая от скорости скольжения c , температуры и энергии активации a ; q — номинальное давление в зоне кон-

тактирующих поверхностей; α — постоянная величина, зависящая от деформационных свойств резины.

Из (7) видно, что с увеличением относительного скольжения (величина c) коэффициент трения f будет увеличиваться.

Полученные результаты работы были апробированы для повышения долговечности обечаек конвейерных роликов конструкции з-да РУДор в условиях Новокриворожского горно-обогатительного комбината. При этом их долговечность возросла в 2,5...4,0 раза за счет нанесения разработанного износостойкого металлополимерного покрытия.

Результаты работы. Выполнены теоретические исследования по обоснованию нормированного нанесения полимерного слоя металлополимерного покрытия, в удобной для инженерных расчетов форме даны рекомендации по определению

расчетного значения коэффициента λ . В лабораторных условиях исследована микроструктура и характер поверхностного слоя покрытия, показана необходимость нормированного нанесения полимерного слоя покрытия. При этом волнистость поверхности металлоидного слоя сохраняется, высота неровностей практически не изменяется, а их шаг увеличивается в 3,5...3,7 раза и соответственно составляют 43...45 и 500...513 мкм. Исследована износостойкость покрытия с твердосплавными порошками ПГ-НЗ и ПГСР, которая в 3,0...4,5 раза выше, чем Стали 20. Даны рекомендации по их применению. Получены численные значения коэффициентов трения металлополимерного защитного покрытия по отношению к резине, величина которого при скольжении 20 % составила 0,43, а при 15 % — 0,243.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.А., Аралкин А.С. и др. А.с СССР 1639082, МКИ С32С4/04. Способ получения комбинированного металлополимерного покрытия/ (СССР) — 449615/02, Заявл. 18.10.88. ДСП.

2. Данко П.Е., Попов А.Г. Высшая математика в упражнениях и задачах. Часть II. — М.: Высшая шк., 1967, с. 84.

3. Применение математических методов планирования экспериментов при

разработке рудных месторождений / А.М. Балуга, Н.И. Деркач, В.Ф. Калинин, В.Ф. Чуб. — К: Наукова думка, 1973. — 161 с.

4. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экспериментов. — М.: Недра, 1965.

5. Крагельский И.В. Трение и износ — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с. **ТИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Аралкин А.С. — кандидат технических наук, доцент;

Аралкина К.А. — соискатель,

Криворожский технический университет, тел.: 8-(0564)-74-29-13.

