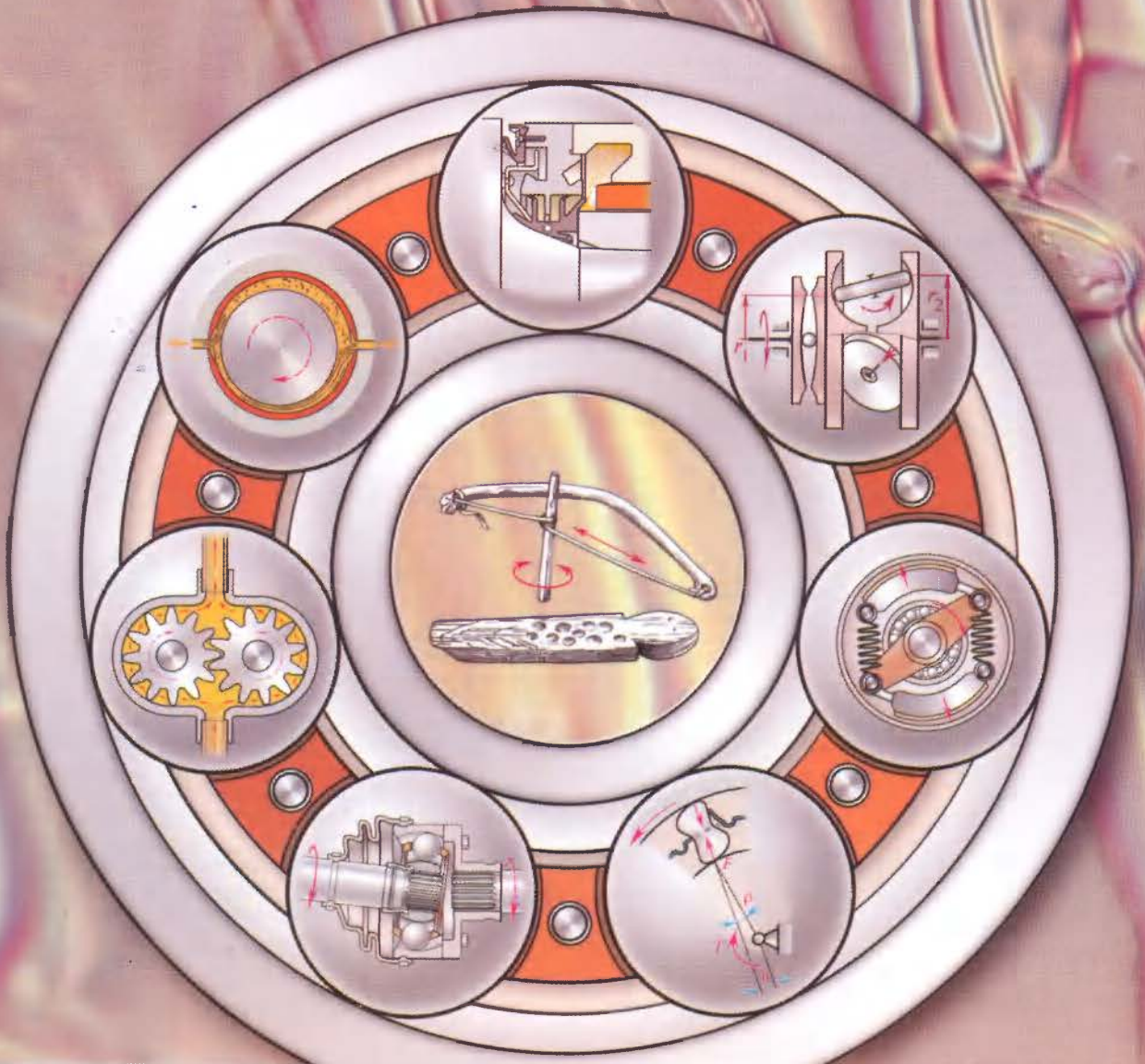


ISSN 1819-2092



ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

11 (ноябрь)
2010





УДК 621.793

П.А. Тополянский, канд. техн. наук (НПФ "Плазмацентр", Санкт-Петербург), Н.А. Соснин, д-р техн. наук, С.А. Ермаков, канд. техн. наук, А.П. Тополянский (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Испытания на трение и эксплуатационную стойкость нанопокрyтия при финишном плазменном упрочнении

Технология финишного плазменного упрочнения путем нанесения безвакуумного износостойкого нанопокрyтия на основе системы Si-O-C-N, отличающаяся мобильностью оборудования и малым потреблением энергии, обеспечивает снижение угла смачивания, коэффициента трения и температуры в зоне контакта. Эти характеристики увеличивают эксплуатационную стойкость упрочненных изделий.

The technology of the finishing plasma strengthening by plotting without vacuum of resistant nanocover because of systems Si-O-C-N, differing by mobility of the equipment and small consumption of energy, ensures decrease of factor of friction and magnification of operational resistance.

Ключевые слова: плазменная технология, нанопокрyтие, угол смачивания, коэффициент трения, нагрузка схватывания, эксплуатационная стойкость.

Key words: plasma technology, nanocover, angle of wetting, factor of friction, operational resistance.

Новая технология [1] финишного плазменного упрочнения (ФПУ) рабочих поверхностей деталей путем нанесения износостойкого кремнийсодержащего нанопокрyтия с использованием малогабаритного, мобильного и маневренного оборудования отличается тем, что этот процесс осуществляется при обычных атмосферных условиях, что предопределяет его низкую трудоемкость и малые энергозатраты (порядка 5 кВ·А).

Покрyтие на основе системы Si-O-C-N в безвакуумной технологии ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи 10...100 мм/с наносится слоями толщиной 30...3 нм. В отличие от конденсированных покрyтий в вакууме, осуществляемых при PVD-процессах, в данном методе покрyтие формируется только в локальной зоне касания плазменной струи подложки. Цикличе-

ское взаимное перемещение плазменной струи и упрочняемой поверхности определяет получение слоистой структуры покрyтия и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на подложку, полностью исключая разупрочняющий отпуск для всех сталей. Интегральная температура упрочняемых деталей при нанесении покрyтия, как правило, не превышает 150 °С.

Формируется упрочняющее покрyтие в виде прозрачной гладкой пленки, которая на полированной поверхности дает интерференционную картину, радужные оттенки которой изменяются по мере роста толщины покрyтия от фиолетово-голубого до зелено-красного.

Наносимое при ФПУ нанопокрyтие является неметаллическим, химически инертным, диэлектрическим, имеет высокую твердость и характеризуется повышенными антисхватывающимися свойствами. Параметры шероховатости поверхности после его нанесения по критериям международного стандарта ISO 13565-2:1996 улучшаются, кривая опорной поверхности становится более полой, что характеризует поверхность с покрyтием как более долговечную. Покрyтие создает в подпленочной зоне сжимающие остаточные напряжения, что благоприятно сказывается на повышении сопротивления усталости. Кроме того, покрyтие обладает повышенными коррозионной и жаростойкостью, что подтверждается длительными испытаниями образцов на воздушную коррозию при температурах до 1000 °С [1].

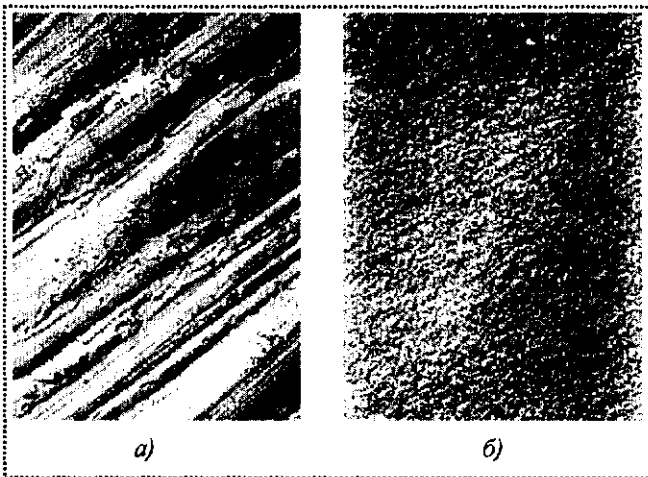


Рис. 1. Микрорельеф поверхности до (а) и после ФПУ (б) ($\times 5000$)

Субмикрорельеф рабочих поверхностей образцов после ФПУ (рис. 1), исследованный на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную топографию поверхности, в то время как субмикрорельеф поверхностей до ФПУ имеет явно выраженные многообразные следы – риски и дефекты от предшествующей абразивной обработки.

Микрорельеф переходной зоны (участок с покрытием – участок без покрытия) исследовался также с использованием прибора MarSurf WS1 (фирма Mahr GmbH, Германия). В зоне без покрытия (слева) имеются достаточно глубокие впадины, имеющие размер в соответствии с масштабной линейкой порядка 1,0...1,2 мкм, оставшиеся от абразивной обработки исходной поверхности. В зоне с покрытием впадины имеют глубину порядка 0,1 мкм. Таким образом, на основании анализа трехмерной профилограммы видно, что после ФПУ обеспечивается залечивание микродефектов и практически всех впадин исходной шероховатости.

Это связано с тем, что покрытие по своей физической сущности осаждается в большей степени во впадинах микрорельефа поверхности, так как микрополости являются более вероятным местом зародышеобразования покрытия, чем плоская поверхность [2]. На этом же явлении основывается и повышенная адгезия наносимого покрытия при ФПУ, связанная с увеличением площади фактического контакта и числа связей между покрытием и подложкой.

Согласно [3], уровень смачивания поверхности смазочными средами в определенных условиях может характеризовать ее трибологические характеристики при трении в этих средах. Так, с увеличением угла смачивания можно ожидать, что износ таких поверхностей возрастет, так как чем больше угол смачивания, тем хуже смазочная среда растекается по поверхности материала (рис. 2).

Для исследования физико-химических свойств поверхности, получаемой в результате нанесения нанопокрyтия методом ФПУ, были проведены эксперименты по определению угла смачивания. На подготовленный образец из стали наносили покрытие (рис. 3) и помещали его в камеру с оптическим увеличителем и с укрепленным в ней приспособле-

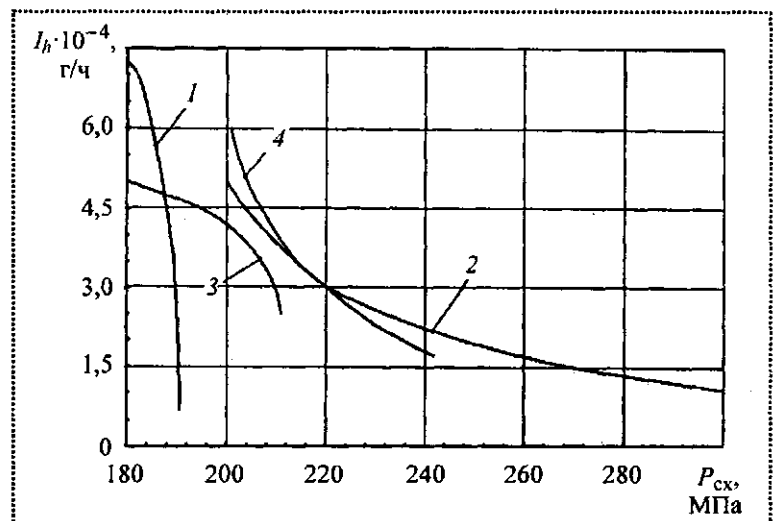


Рис. 2. Взаимосвязь скорости изнашивания с нагрузкой схватывания $P_{сх}$ для материалов с углами смачивания: 1 – 25°; 2 – 50°; 3 – 45°; 4 – 60°

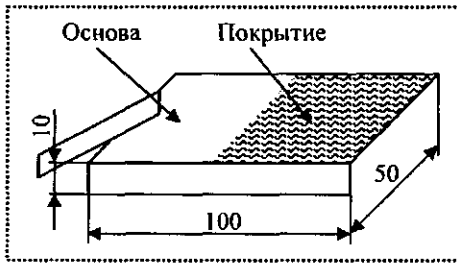


Рис. 3. Образец для определения угла смачивания

нием типа пипетки, из которого на поверхность переносили каплю масла (рис. 4). Угол смачивания регистрировали микрометрической угловой линейкой. Для исключения ошибки в камере поддерживалась постоянная температура. Размер капли постоянен и фиксирован диаметром пипетки.

В результате испытаний были измерены углы смачивания поверхности покрытия и подложки, которые составили, соответственно, 45 и 60°. Таким образом, покрытие обладает более высокими гидрофильными свойствами поверхности по сравнению с подложкой, при этом угол смачивания, имея меньшее значение, обеспечивает лучшую смазывающую способность поверхности с покрытием.

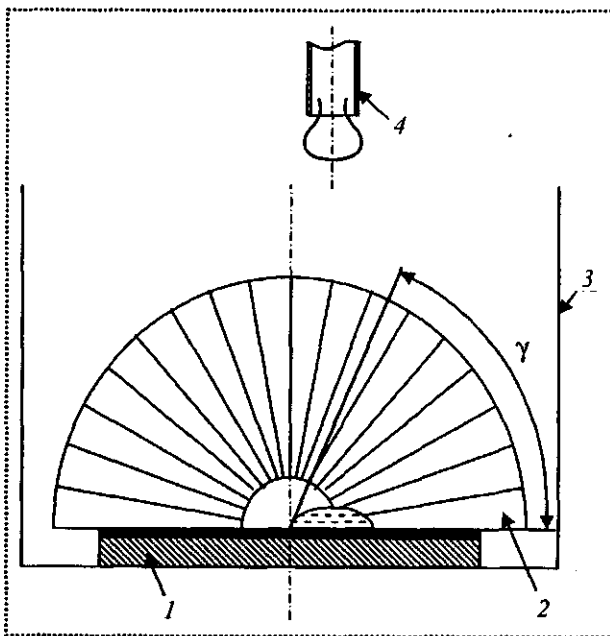


Рис. 4. Определение угла смачивания:
1 – образец с нанесенным покрытием; 2 – шкала угловая; 3 – камера; 4 – пипетка

В соответствии с современными представлениями [4] для определения эффективности применения данных покрытий были проведены испытания, основной целью которых являлась оценка работоспособности нанопокрывания по критериям трения и износа: нагрузки схватывания, коэффициента трения, температуры в сопряженной паре, интенсивности изнашивания трущихся тел. Кроме этого, определяли влияние на эти параметры толщины наносимого покрытия, что позволило оценить оптимальную толщину покрытия по критерию минимального износа.

В качестве образцов для испытаний на трение и износ использовали внутренние кольца подшипников качения, изготовленные из термообработанной до 62 HRC стали ШХ15 диаметром 40 мм. На наружную поверхность колец наносили нанопокрывание системы Si–O–C–N методом ФПУ на следующем режиме: расход транспортирующего газа – 0,71 л/мин, расход плазмообразующего газа – 2,3 л/мин, дистанция от плазмотрона до поверхности образца при нанесении покрытия – 15 мм, ток дуги – 100 А, напряжение на дуге – 35 В, угол наклона плазмотрона к поверхности нанесения покрытия – 30°, скорость вращения образца – 40 мин⁻¹, продолжительность нанесения покрытия – 20, 40, 60 с. Процесс обработки проводился в циклическом режиме: число циклов обработки – 3, продолжительность нанесения покрытия в первом цикле 10 с, в последующих – от 10 до 20 с. Толщина покрытия, определяемая с использованием компьютерной программы "Выбор режимов ФПУ" [1], соответственно составляла 50, 100 и 150 нм.

Сравнительные испытания на трение и износ проводились в соответствии с ГОСТ 23.224 на установке СМЦ-2. Испытания проходили по схеме "диск по диску". Образцы с покрытием устанавливали на вал в каретку машины трения поочередно с неупрочненной сопряженной парой, в качестве которой выступало неподвижное кольцо из стали 45 диаметром 33,5 мм со вставкой, изго-



товленной из термообработанной до твердости 62 HRC стали ШХ15. После установки образцов на валу индикатором контролировали их радиальное биение, которое не превышало 0,03 мм.

Условия испытания – трение качения без проскальзывания (0 ± 2) %; при капельном смазывании маслом И-40А по ГОСТ 20799–88 (6 капель в минуту) и подачей абразива (порядка 3 г в капле масла). В качестве абразива использовали мелкозернистый (от 0,25 до 0,1 мм) диоксид кремния SiO_2 . В процессе испытаний момент трения измеряли на нижнем образце, а температуру – на верхнем неподвижном образце с использованием термпары, зачеканенной между вставкой из стали ШХ15 и кольцом. Измерение температуры проводили в момент реализации нагрузки схватывания. Испытания проводили при частоте вращения образцов 300 мин^{-1} при переменной нагрузке от 200 до 3000 Н. Нагрузку на образцы постепенно повышали через каждые 15 мин в интервале от 200 до 2000 Н. При дальнейшем увеличении нагрузки определялся всплеск момента трения. Нагрузку и момент трения при этом фиксировали.

Основными критериями триботехнических свойств нанопокровтий, наносимых методом ФПУ, приняты нагрузка схватывания – $P_{\text{сх}}$, коэффициент трения – f , износ при трении, температура в трибологическом контакте.

Температуру в трибологическом контакте и значения момента трения снимали в ходе испытания с соответствующих датчиков. Коэффициент трения вычисляли после определения момента трения по формуле

$$f = \frac{M_T}{F_N R},$$

где M_T – момент трения;

F_N – нагрузка;

R – радиус образца.

Износ образцов оценивали по потере размера образцов за 1 ч испытаний при постоянной нагрузке 2000 Н; измерения проводили с использованием микрометра МР-50/0,002 по ГОСТ 4381–87. Выбор данной нагрузки определялся условиями эксплуатации подшипниковых узлов. Результаты триботехнических испытаний приведены в табл. 1.

1. Характеристики трения и износа в зависимости от толщины наносимого покрытия

Номер образца	Толщина покрытия, нм	Момент трения M_T , Н·м	Коэффициент трения f	Нагрузка схватывания $P_{\text{сх}}$, кН	Износ образца за 1 ч, мкм	Температура в контакте, °С
1	50	2,82	0,073	0,210	0,05	48
2	100	2,6	0,068	0,230	0,012	41
3	150	2,5	0,065	0,232	0,01	41
4	Без покрытия	3,1	0,08	0,180	0,064	80

Сравнительные трибологические испытания стальных образцов с исследуемым нанопокровтием и образцов без покрытия показали, что:

1. Коэффициент трения образцов с нанопокровтием меньше, чем у образцов без покрытия примерно на 25 %.

2. Нагрузка схватывания по данным испытаний для образцов с покрытием на 30 % больше по сравнению с образцами без покрытия.

3. Температура в контакте образца с покрытием и образца без покрытия на машине трения в ходе испытания ниже примерно на 45 %, чем у образцов без покрытия. Поэтому можно сделать вывод о том, что для образца с покрытием процесс трения идет более стабильно и при меньшей температуре нагрева.

4. Износ образцов уменьшается в зависимости от продолжительности нанесения покрытия. Причем увеличение времени с 20 до 40 с уменьшает износ в 5 раз, дальнейшее увеличение времени с 40 до 60 с уменьшает износ

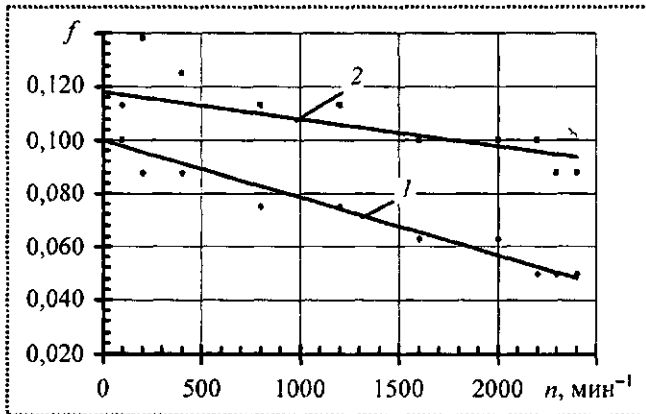


Рис. 5. Зависимость коэффициента f пар трения покрытие–20X13 (1) и 20X13–20X13 (2) от частоты вращения образцов

незначительно. Следовательно, оптимальным с точки зрения критерия продолжительности нанесения – износостойкость нанопокрyтия является образец № 2 с толщиной покрытия 100 нм: его износ меньше износа исходного образца без покрытия в 5,3 раза.

Триботехнические испытания также проводили с использованием образцов из стали 20X13 в виде роликов с наружным диаметром 42 мм, внутренним диаметром 16 мм и шириной 15 мм. На цилиндрическую поверхность наносили покрытие методом ФПУ. По результатам испытаний были построены зависимости коэффициента трения и температуры в сопряжении от частоты вращения n образцов (рис. 5 и 6). Эти испытания показали, что коэффициент трения образцов с покрытием меньше, чем у образцов без покрытия, в 1,5–2 раза; коэффициент трения образцов с покрытием уменьшается с увеличением скорости вращения, следовательно, покрытие обеспечивает бóльшую работоспособность для систем с более высокими скоростями вращения; температура в сопряжении образцов с покрытием при испытаниях на машине трения ниже примерно на 30 %, чем у образцов без покрытия.

Таким образом, антифрикционные свойства тонкопленочного покрытия, наносимого в процессе ФПУ, превосходят аналогичные характеристики образцов без покрытия и, соот-

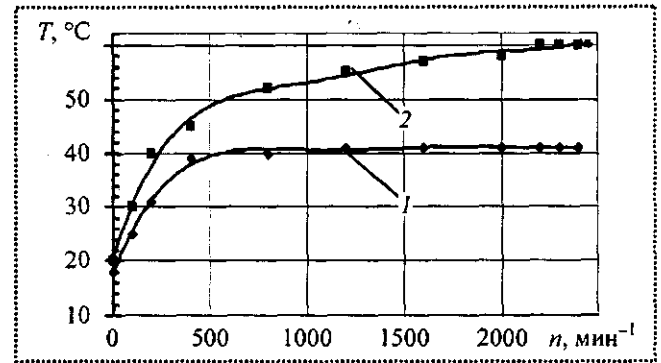


Рис. 6. Зависимость температуры образцов пар трения покрытие–20X13 (1) и 20X13–20X13 (2) от частоты вращения

ветственно, покрытие обеспечивает более высокие трибологические характеристики для данной пары трения трибосистемы.

Совместно с ОАО "АвтоВАЗ" были проведены исследования по определению значений коэффициента трения при моделировании технологической операции вытяжки листового проката без покрытия (черного) и электрооцинкованного проката (ЭЦ) в штампах, изготовленных из чугуна марки ХФ. Исследовали четыре состояния материала чугунных штампов – в исходном виде, после нанесения упрочняющего нанопокрyтия методом ФПУ и после наплавки алюминиевой бронзы электродом EutecTrode XHD-1855 и высоколегированной бронзы электродом EutecTrode 1868 (фирма Castolin S.A., Швейцария).

Для моделирования процесса вытяжки были изготовлены образцы из чугуна в виде роликов диаметром 50 мм и длиной 30 мм. На универсальной испытательной машине FRZ-100/1 (фирмы HECKERT, Германия) с помощью специального приспособления полосу металла перетягивали через неподвижно закрепленный ролик, чем моделировали поведение металла в вытяжном штампе. При этом один конец полосы фиксировали неподвижно в горизонтальном направлении, полоса огибала ролик, а к другому концу полосы прикладывали растягивающую силу от раз-



рывной машины в вертикальном направлении. При такой схеме нагружения участки полосы, расположенные по разные стороны относительно ролика, получали разные степени деформации, так как в результате действия силы трения металла полосы о ролик растягивающая сила P_1 на ее горизонтальном участке меньше, чем сила P_2 на вертикальном участке. На этом явлении основывался метод определения коэффициента трения.

Условия проведения испытаний: размер полосы $450 \times 20 \times 0,8$ мм; материал – сталь 08Ю ОСВ; число образцов листового металла на каждый вид испытаний – 3; смазочный материал – промышленное масло И-20; скорость нагружения образцов – постоянная, 10 мм/мин. Поверхность чугунных образцов (роликов) имела разные параметры шероховатости (табл. 2) для установления ее влияния на коэффициент трения. Для каждого варианта изготовления штампа (с нанесением нанопокртия методом ФПУ, с наплавкой бронзовых сплавов и без покрытия) и каждого значения шероховатости проводили по три испытания по вытяжке ЭЦ-стали и стали без покрытия из черного проката.

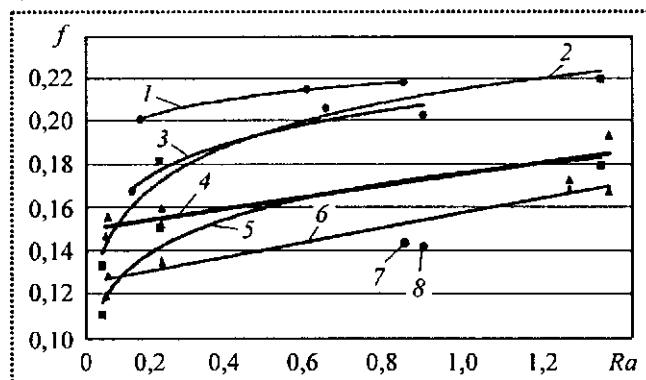


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от параметра шероховатости Ra поверхности штампа:

1 – бронза 1855–ЭЦ; 2 – чугун ХФ без обработки – ЭЦ; 3 – бронза 1868–ЭЦ; 4 – чугун ХФ с ФПУ – ЭЦ; 5 – чугун ХФ без обработки – черный прокат; 6 – чугун ХФ с ФПУ – черный прокат; 7 – бронза 1855 – черный прокат; 8 – бронза 1868 – черный прокат

Средние значения коэффициентов трения для некоторых значений шероховатости приведены в табл. 2. Результаты экспериментов представлены на рис. 7.

Анализ результатов испытаний (рис. 7) показывает, что коэффициент трения зависит от величины параметра шероховатости, способа обработки поверхности и от использования черного или ЭЦ-проката.

2. Коэффициенты трения для разных видов поверхности чугунных образцов – имитаторов штампа

Вид обработки образца	Параметр шероховатости образца Ra , мкм	Коэффициент трения при испытаниях	
		с черным прокатом	с электрооцинкованным прокатом
Без обработки	0,07	0,1111	0,1337
Без обработки	0,22	0,1511	0,1813
Без обработки	1,35	0,1793	0,2197
ФПУ с нанопокртием	0,08	0,1199	0,1474
ФПУ с нанопокртием	0,224	0,1365	0,1528
ФПУ с нанопокртием	1,27	0,1681	0,1729
Наплавка бронзы 1855	0,17	–	0,201
Наплавка бронзы 1855	0,6	–	0,215
Наплавка бронзы 1855	0,85	0,144	0,218
Наплавка бронзы 1868	0,15	–	0,168
Наплавка бронзы 1868	0,65	–	0,206
Наплавка бронзы 1868	0,9	0,142	0,2027



3. Зависимости коэффициента трения от вида обработки поверхности образца

Вид обработки	Черный прокат	R^2	ЭЦ-прокат	R^2
Без обработки	$f = 0,022 \ln(Ra) + 0,176$	0,95	$f = 0,028 \ln(Ra) + 0,215$	0,96
ФПУ	$f = 0,037 Ra + 0,122$	0,95	$f = 0,021 Ra + 0,147$	0,99
Наплавка бронзы 1855	$f = 0,144$ при $Ra = 0,85$	–	$f = 0,0107 \ln(Ra) + 0,220$	0,998
Наплавка бронзы 1868	$f = 0,142$ при $Ra = 0,9$	–	$f = 0,0214 \ln(Ra) + 0,210$	0,94

При любом варианте обработки поверхности образцов трение для ЭЦ-проката оказывалось выше (см. кривые 1–4 на рис. 7), чем для черного проката (кривые 5–8). В частности, в случае с необработанным штампом коэффициент трения возрастает на 24 % и выше при переходе с черного проката на ЭЦ-металл (кривые 2 и 5, рис. 7) при Ra 0,6...1,4.

При уменьшении параметра шероховатости поверхности до Ra 0,07...0,08 коэффициенты трения для чугуна без обработки и с ФПУ практически выравниваются. С увеличением до значений Ra 0,4...1,4 линии на графиках (см. рис. 7) идут практически параллельно. Для значений Ra 0,6...1,0, соответствующих значениям шероховатости штамповой оснастки, ФПУ позволяет сократить коэффициент трения на 11...13 % для черного проката и на 22...25 % для ЭЦ-проката.

Дуговая наплавка бронзой для значений Ra 0,85...0,9 (точки 7 и 8, рис. 7) позволяет снизить коэффициент трения, но при этом коэффициент трения нанопокртия при ФПУ все же остается меньше. Таким образом, технология нанесения упрочняющего нанопокртия может конкурировать с технологией нанесения покрытий методами наплавки.

Для ЭЦ-проката испытания показали, что дуговая наплавка бронзой марки 1868 практически не дает эффекта, а для марки 1855 коэффициент трения оказался даже выше, чем для варианта без обработки (кривые 1 и 3 в сравнении с кривой 2, рис. 7).

В результате обработки полученных значений по методу наименьших квадратов устано-

вили, что зависимость коэффициента трения от параметра шероховатости Ra удовлетворительно описывается уравнениями, приведенными в табл. 3. При этом значения достоверности аппроксимации R^2 находились в диапазоне 0,94...0,98.

Эффективность использования нанопокртия системы Si–O–C–N была подтверждена натурными испытаниями и последующим внедрением технологии ФПУ в ОАО "НПО "Сатурн" (г. Рыбинск) для повышения долговечности специальных подшипников качения. Стендовые испытания, проведенные в ОАО "Благовещенский арматурный завод", задвижки ЗКЛ 15-250 с клином из материала 30X13 и данным нанопокртием показали повышение в 2 раза износостойкости уплотнительных поверхностей клина, уменьшение количества задиров и снижение коэффициента трения между уплотнительными поверхностями по отношению к серийному изделию. В ОАО "Новосибирский механический завод" натурные испытания вытяжных пуансонов и матриц с нанопокртием для изготовления такой массовой продукции, как оружейные патроны, показали повышение ресурса более чем в 2,5 раза.

Испытания деталей пресс-форм для литья под давлением алюминиевых и медных сплавов с нанопокртием, проведенные на ОАО "Приборостроительный завод" (г. Саранск), ОАО "Теплоконтроль" (г. Сафоново), ОАО "Сарапульский электрогенераторный завод" и т.д., также показало многократное повышение их стойкости. Эффективность технологии и обеспечение многократного повышения стой-



4. Производственные испытания изделий с нанопокрывтием, нанесенным методом ФПУ

Тип инструмента	Материал		Стойкость		Относительное повышенное стойкости, раз	Организация, проводившая испытания
	инструмента	заготовки	до упрочнения	после упрочнения		
Сверло Ø2,0	P6M5	Д16	–	–	2,5	"НПО Автоматики", г. Екатеринбург
Сверло Ø2,1	P6M5	30ХГСА	1600 отв.	5000 отв.	3,0	ОАО "Электромаш. завод "Лепсе", г. Киров
Сверло Ø3,0	P6M5	ВЧ 70	0,08 ч	0,46 ч	5,75	ОАО "Моторостроительный завод", г. Харьков
Сверло Ø4,2	P6M5	12ХН3А	1 ч	5 ч	5,0	ОАО "Завод технологической оснастки", г. Николаев
Сверло Ø5	P6M5	АК7	300 шт.	4080 шт.	13,6	ООО "Топливные системы", г. Санкт-Петербург
Сверло Ø8,9	P6M5	Сталь 45	0,045	0,183	4,0	ОАО "Турбомеханический завод", г. Полтава
Метчик М3	P6M5	ВТ1-0	5 отв.	12 отв.	2,4	НПЦ "ПО «Старт», Заречный
Метчик М8	P6M5	Сталь 40Х	2 ч	6 ч	3,0	"Морской завод", г. Кронштадт
Метчик М10	P6M5	12Х18Н10Т	1 ч	2,25 ч	2,25	ОАО "Электрокомплекс", г. Минусинск
Метчик М16	P6M5	Сталь 35Л	8 отв.	80 отв.	10,0	"Вагоностроительный завод", г. Усть-Катав
Метчик М24	P6M5	40Х	80 шт.	240 шт.	3,0	ОАО "Калужский турбинный завод", г. Калуга
Развертка Ø8	P6M5	Силумин	2,5 ч	15,3 ч	6,5	ОАО "Прогресс", Санкт-Петербург
Развертка Ø14	P6M5	У8А	4 ч	9 ч	2,25	ОАО "Царскосельский завод", г. Пушкин
Развертка Ø20	P6M5	Сталь 40Х	2,8 ч	6,8 ч	2,4	ОАО "Киевтрактородеталь", Киев
Твердосплавные пластины	T15K6	34ХН1М	5 ч	10 ч	2,0	ОАО "Уралмаш", г. Екатеринбург
Твердосплавные пластины	ВК6	Сталь 25Л	2 корпуса	20 корпусов	10,0	ОАО "Знамя Труда", г. Санкт-Петербург
Фреза концевая Ø10	P6M5	X12	571 мм	2320 мм	4,1	НПО им. Коминтерна, г. Санкт-Петербург
Фреза шпоночная Ø12	P6M5	Сталь 45	16 ч	39 ч	2,4	ОАО "Царскосельский завод", Пушкин
Фреза чистовая	P18	Сталь P2МА (241 НВ)	5 пазов	8 пазов	1,6	Филиал "Силовые машины" ЛМЗ, г. Санкт-Петербург
Фреза фасонная	P6M5	Сталь АС-14	550 дет.	1650 дет.	3,0	ОАО "Автоагрегатный завод", г. Димитровград
Зенкер	P6M5	Сталь 45	3 ч	6 ч	2,0	"Морской завод", г. Кронштадт
Резец фасонный круглый	P6M5	СЧ20	1,5 ч	4 ч	2,7	ОАО "Моторный завод", г. Ульяновск
Резец фасонный круглый	T15K6	АК7	510 дет.	1015 дет.	2,0	ООО "Топливные системы", г. Санкт-Петербург
Резец отрезной	P6M5	Сталь 45	2 ч	16 ч	8,0	"Морской завод", г. Кронштадт
Резец канавочный	P6M5	Сталь 45	6 ч	17 ч	2,5	"Промтрактор", г. Чебоксары

кости деталей технологической оснастки и инструмента позволило внедрить данный процесс на инструментальных производствах таких крупных предприятий, как ОАО

"Корпорация "Иркут", ОАО "НПК "Уралвагонзавод", ФГУП "Усть-Катавский вагоностроительный завод" и др. В табл. 4 показаны примеры производственных испытаний режу-

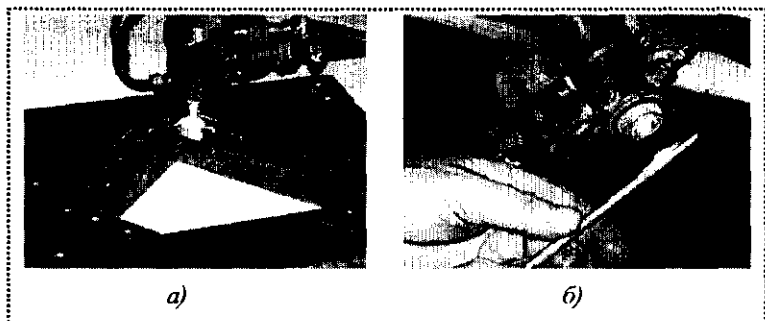


Рис. 8. ФПУ штампа в автоматическом режиме (а), ФПУ метчика в ручном режиме (б)

шего инструмента с упрочняющим нанопокрывтием системы Si–O–C–N.

ФПУ путем нанесения упрочняющего нанопокрывтия возможно как в автоматическом, так и в ручном режиме (рис. 8).

Выводы

1. Исследование субмикрорельефа поверхности с нанопокрывтием, наносимым методом ФПУ, выявили залечивание ее микродефектов после предшествующей абразивной обработки.

2. Покрытие обладает повышенными гидрофильными свойствами по сравнению с подложкой.

3. Триботехнические испытания показали, что коэффициент трения меньше, а нагрузка схватывания образцов с нанопокрывтием системы Si–O–C–N выше, чем у аналогичных образцов без покрытия.

4. Температура вблизи места контакта для сопряжения образца с покрытием и образца без покрытия в ходе испытаний на машине трения уменьшилась почти на 50 % по сравнению с образцами без покрытия.

5. При толщине покрытия 100 нм износ образца уменьшается в 5 раз по сравнению с исходным образцом без покрытия, дальнейшее увеличение толщины покрытия до 150 нм уменьшает износ незначительно.

6. Покрытие обеспечивает большую работоспособность пар трения с более высокими скоростями вращения, так как коэффициент трения образцов с покрытием уменьшается с увеличением скорости вращения.

7. Для значений Ra 0,6...1,0, соответствующих значениям шероховатости штамповой оснастки для вытяжки на ОАО "АВТОВАЗ", ФПУ позволяет уменьшить коэффициент трения на 11...13 % для черного проката и на 22...25 % для электрооцинкованного проката.

8. Технология финишного плазменного упрочнения путем нанесения без вакуума износостойкого нанопокрывтия на основе системы Si–O–C–N, отличаясь мобильностью оборудования и малым энергопотреблением, может обеспечить увеличение эксплуатационной стойкости ряда изделий, работающих в условиях трения и износа.

Библиографический список

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 406 с.
2. Хирс Д., Паунд Г. Испарение и конденсация. М.: Металлургия, 1966. 196 с.
3. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 352 с.
4. Современная трибология: Итоги и перспективы / Отв. редактор К.В. Фролов. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 480 с.

Контактные координаты авторов

Тополянский Павел Абрамович – e-mail: info@plasmacentre.ru