

УДК 621.91.01, 621.816
DOI:10.30987/2223-4608-2020-12-31-38

Т.А. Моргаленко, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: margokru@mail.ru

Технология обработки поверхностей трения скольжения, основанная на применении твёрдых износостойких покрытий, с учётом влияния технологической наследственности

Рассмотрены вопросы технологического обеспечения износостойкости поверхностей трения скольжения. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния режимов предварительной обработки, нанесения покрытий и окончательной обработки поверхностей трения скольжения на параметры их качества.

Ключевые слова: износостойкость; износостойкие покрытия; технологическая наследственность; алмазное выглаживание.

T.A. Morgalenko, Can. Sc. Tech.
(Bryansk State Technical University,
7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, Russia, 241035)

Technology of sliding friction surface machining based on hard wear-resistant coating use taking into account technological inheritance impact

The matters of technological support of wear-resistance for sliding friction surfaces are considered. The results of experimental theoretical investigations of modes impact of preliminary machining, coating application and sliding friction surfaces finishing upon their quality parameters are shown.

Keywords: wear-resistance; wear-resistant coatings; technological inheritance; diamond smoothing.

В сфере производства изделий машиностроения широко развиваются новые направления обеспечения и повышения надёжности продукции, в числе которых: применение упрочняющих технологий при обработке материалов и деталей, внедрение автоматизированных средств неразрушающего контроля и технического диагностирования на базе ЭВМ, внедрение робототехники и гибких автоматизированных производств.

Развивать далее эти направления совершенствования производства необходимо посредством повышения точности и параметрической надёжности технологических систем.

Исследования влияния технологических методов обработки и их условий на качество поверхностей и эксплуатационные свойства деталей машин ведутся по двум направлениям: 1) технологическое обеспечение эксплуатационных свойств посредством управления параметрами состояния поверхностного слоя на стадии изготовления; 2) установление

непосредственной связи эксплуатационных свойств с условиями обработки [1].

Многочисленные исследования российских и зарубежных ученых показывают, что долговечность и безотказность деталей машин зависят во многом от состояния их тонких поверхностных слоев. Так как нагрузка является функцией, зависящей от времени, то условия эксплуатации соединений деталей машин будут иметь динамическую природу. Это говорит о необходимости проведения исследований технологического обеспечения параметров износостойкости в динамике. В качестве объекта исследований были выбраны соединения типа подшипников скольжения.

Одним из важнейших критериев надёжности изделий машиностроения является износостойкость. В решении проблемы повышения износостойкости особенно велика роль технологии обработки функциональных поверхностей деталей.

Технологический процесс изготовления де-

талей и их износостойкость связаны между собой через параметры качества их поверхностей трения скольжения. Следовательно, на стадии изготовления деталей машин существует возможность технологического обеспечения их износостойкости.

Учение об инженерии поверхности [1], получившее развитие в настоящее время, позволяет решать такие проблемы как:

- установление, исходя из функционального назначения, оптимальной формы и качества рабочих поверхностей деталей машин;
- технологическое обеспечение, как на стадии проектирования, так и на стадии изготовления, необходимой формы и качества поверхностей деталей машин с учётом наименьшей себестоимости;
- исследование явления технологической наследственности формы и качества поверхностного слоя деталей и их изменения при эксплуатации;
- модификация рабочих поверхностных слоёв деталей при изготовлении и ремонте;
- адаптивное управление и контроль формы и параметров качества поверхностей деталей.

Особо интересны предложенные комплексные параметры оценки состояния поверхностного слоя, включающие геометрические характеристики поверхности и её физико-механические свойства [2].

Так, комплексный параметр C_x , включающий характеристики шероховатости, волнистости и макроотклонений, был предложен в работе [2]:

$$C_x = \frac{(Ra \cdot Wz \cdot H \max)^{1/6}}{t_m^{3/2} \cdot S_m^{1/2} \cdot u_n^{2/3} \cdot \lambda}, \quad (1)$$

где t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии $\left(p = \frac{Rp}{R \max} 100\%\right)$;

λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на износ, $\lambda = \left(\frac{\sigma_B - \sigma_{ост}}{\sigma_a}\right)^{t_y}$, где σ_B – временное сопротивление разрыву; σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в рабочем слое; t_y – параметр фрикционной усталости при упругом контакте.

Таким образом, управлять износостойкостью деталей в значительной мере можно за счёт изменения параметров качества их поверхностного слоя.

Под поверхностным слоем, в данном случае, понимается объём материала, лежащего непосредственно под границей раздела двух сред, обладающий совокупностью геометрических, физических и химических характеристик, отличающихся от свойств основного материала. Оценивая износостойкость, пользуются средними показателями интенсивности линейного, объёмного и массового износа при установленном режиме. Зная необходимый срок службы деталей пары трения, можно определить требуемую величину интенсивности изнашивания. Если для пары трения большое значение имеет период приработки, то в этом случае используют показатели величины начального износа и параметры степенной аппроксимации кривой начального износа.

Направление неровностей по отношению к направлению скольжения поверхностей также оказывает значительное влияние на условия трения и износа. Так, при параллельном направлении неровностей для несмазанного контакта износ снижается. В целом направление неровностей может изменять величину износа в 6 – 7 раз. Направление неровностей оказывает влияние на износ до определённой их высоты, ниже которой износостойкость нечувствительна к направлению неровностей. К своему оптимальному значению параметры шероховатости стремятся в период приработки трущихся поверхностей, при этом изменяется форма профиля и направление следов обработки. Только от условий трения и износа зависит оптимальное значение параметров шероховатости.

Шероховатость, которая устанавливается в процессе приработки, обеспечивает минимальную интенсивность изнашивания и является оптимальной. Такую шероховатость называют равновесной [3]. Известно, что на параметры шероховатости, устанавливающиеся при трении, оказывают влияние параметры качества поверхностного слоя, сохраняющиеся при изнашивании и созданные при изготовлении.

Современные возможности выбора соответствующих условий обработки позволяют решить задачу технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин.

Принципы технологического наследования позволяют утверждать, что состояние изделия, т.е. его качество, определяется не только силами (давление, момент сил, температура и пр.), действующими на объект в данный момент времени, но и теми силами и другими факторами, которые действовали на него в

прошлом.

Изменения свойств поверхностного слоя при трении происходят за счёт его деформирования и воздействия температуры, а влияние на этот процесс оказывают характеристики твёрдости. Процессы, определяющие появление или изменение величин остаточных напряжений, происходят в поверхностном слое. Деформирование и появление остаточных напряжений происходит одновременно с изменением структуры поверхностного слоя. Образование вакансий и облегчение выхода на поверхность дислокаций способствуют разрушению поверхности и понижают прочность тончайшего поверхностного слоя. Данные процессы определяются параметрами твёрдости, структурой, фазовым составом и остаточными напряжениями в поверхностном слое, которые возникли при изготовлении.

Уменьшение прочности поверхностных слоёв материалов происходит при адсорбции на поверхности поверхностно-активных веществ (ПАВ). Как внешний адсорбционный эффект, так и внутренний, который вызывается движением атомов и молекул поверхностно-активных веществ в микротрещины, оказывают влияние на прочностные свойства поверхностных слоёв.

Следует иметь в виду, что диффузионные процессы в поверхностном слое определяют, в значительной мере, износ в отдельных парах трения. Так, концентрация водорода в поверхностном слое вызывает ускорение изнашивания. Водородная хрупкость металла за счёт действия факторов среды и внутренних условий может ускорять изнашивание на один-два порядка. Решающую роль при этом играют термодинамические факторы.

О том, что поверхностные слои при трении имеют меньшую прочность, чем нижележащие, показывают исследования микротвёрдости слоёв при трении.

Из физико-химических параметров качества поверхностного слоя, на сегодняшний день, наиболее изучен вопрос о влиянии на износостойкость поверхностной твёрдости и остаточных напряжений. Таким образом, с целью уменьшения износа при механическом и молекулярном взаимодействии может быть использовано предварительное упрочнение, как средство повышения жёсткости поверхностных слоёв и уменьшения их взаимного внедрения.

Устойчивость остаточных напряжений в процессе изнашивания определяется величиной напряжений в зависимости от приложен-

ной внешней нагрузки. Под действием протекающей пластической деформации, в условиях пластического контакта, остаточные напряжения растяжения полностью снимаются, и в поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия. В условиях же упругого контакта остаточные напряжения сжатия повышают износостойкость, а остаточные напряжения растяжения снижают её.

Таким образом, характеристики качества поверхностей деталей машин в значительной степени определяют их износостойкость.

В обычных условиях поверхности твёрдых тел покрыты различного рода плёнками. При контактировании твёрдых тел взаимодействие осуществляется не между самими твёрдыми телами, а между плёнками, покрывающими их поверхности, либо при взаимодействии происходит первоначальное разрушение плёнок. Особое влияние на процесс трения и износа оказывают плёнки и покрытия, наносимые искусственно с целью повышения износостойкости поверхностей.

Развитие триботехнологии и достижения в области физики твёрдого тела позволили освоить методы, способные повысить износостойкость трущихся поверхностей в несколько раз. Эти методы связаны с нанесением на контактирующие поверхности трибоэлементов покрытий как твёрдых, так и мягких. Назначение твёрдого покрытия в этом случае заключается в обеспечении высокой износостойкости в период нормального изнашивания, а мягкие прирабочные плёнки обеспечивают создание благоприятных условий и ускорение процесса приработки. Существуют различные способы получения твёрдых покрытий. Например, известен метод напыления на поверхности обрабатываемых и восстанавливаемых деталей твёрдых покрытий толщиной до десятых долей миллиметров с последующей механической обработкой и метод нанесения упрочняющих покрытий способом конденсации вещества в вакууме ионной бомбардировкой (КИБ).

В основу процесса напыления покрытий положено использование теплоты газового пламени или электрической дуги с целью разогрева частиц напыляемого металла до плавления или близкого к нему состояния и напыления на обрабатываемую поверхность. Процесс обладает целым рядом преимуществ. Основным из них является возможность нанесения различных покрытий на изделия из самых различных материалов. Кроме того, становится возможным восстановление изношен-

ных деталей.

Сам процесс обладает высокой производительностью. Достигнутый в результате использования этого процесса эффект – это высокая износостойкость напылённых покрытий. Это обеспечивается за счёт равномерного распределения твёрдых соединений в материале покрытия. В условиях трения со смазкой высокой эффективностью отличаются молибденовые покрытия, что объясняется химическим средством молибдена и серы. В связи с этим при выделении серы из смазки образуется дисульфид молибдена MoS_2 , обладающий хорошими смазочными характеристиками.

Покрытия, получаемые напылением, имеют толщину от десятых долей до миллиметров. Так как слой покрытия не обладает достаточной точностью, а сама поверхность отличается высокой шероховатостью, она подвергается дальнейшей чистовой обработке.

Упрочняющие покрытия, получаемые способом КИБ, довольно перспективны. Вакуумные покрытия на основе нитридов титана и молибдена получили наибольшее распространение. Толщина покрытий на основе нитридов титана и молибдена, получаемых методом КИБ, составляет 3...20 мкм. Такие покрытия отличаются весьма высокой износостойкостью. Так, например, при упрочнении режущего инструмента они не требуют дальнейшей обработки. Стойкость инструмента и оснастки, упрочнённых по методу КИБ, повышается при обработке при нормальных и повышенных температурах ($T = 970$ К) стали, чугуна и латуни в 2...3 раза.

Следует отметить, что применение твёрдых покрытий на основе титана и молибдена, получаемых методом КИБ, в настоящее время в подавляющем большинстве случаев рассматривается как средство существенного повышения стойкости обрабатываемого и мерительного инструмента. При этом совершенно не рассматривается изнашивающее воздействие твёрдого покрытия на поверхность контртела, так как в этом случае не имеет значения износостойкость сопрягаемой поверхности. При использовании твёрдых покрытий для повышения износостойкости деталей и узлов, работающих в условиях трения скольжения, необходимо обеспечить высокую износостойкость как охватываемой поверхности (вала), имеющей твёрдое покрытие, так и сопряжённой с ней охватывающей поверхности (вкладыша).

Для вкладыша высокая износостойкость может обеспечиваться посредством создания

благоприятного микрорельефа поверхности с твёрдым покрытием за счёт соответствующего технологического воздействия. Так, например, эффективными могут оказаться методы обработки твёрдого покрытия поверхностным пластическим деформированием (ППД). При использовании твёрдых износостойких покрытий целесообразно применять последующую отделочно-упрочняющую обработку, а именно: алмазное выглаживание. Высокая твёрдость и тонкослойность таких покрытий создают определённые трудности применения обычных методов резания и пластического деформирования.

При выполнении исследований рассматривалось влияние на износостойкость пары трения скольжения твёрдых покрытий поверхностей валов, получаемых методом ионного осаждения в вакууме (КИБ), работающих в паре со вкладышами из меди (или с медным покрытием), а также со вкладышами, имеющими покрытия из мягких материалов («олово – висмут»), получаемые гальваническим способом. Медь обладает способностью иницирования избирательного переноса, а выбор покрытия «олово – висмут» обоснован «мягкими» режимами процесса приработки пары трения.

Используемые образцы (валы) изготавливались из стали 45, закалённой до 48...52 HRC, поскольку она является типичным представителем среднеуглеродистых конструкционных сталей, широко распространённых в общем машиностроении при изготовлении валов и осей, опоры которых работают в условиях трения со смазкой. В качестве твёрдых покрытий использовались нитриды титана и молибдена.

Технология синтезировалась на основе нанесения на охватываемые поверхности трибоэлементов твёрдых износостойких нитридосодержащих покрытий. При этом были использованы три ступени соответствующего технологического процесса:

- 1) подготовка поверхности под нанесение твёрдого износостойкого покрытия с обеспечением соответствующих технических требований;
- 2) нанесение покрытия в соответствии со специальной технологией;
- 3) финишная обработка поверхности нанесённого покрытия с целью обеспечения износостойкости сопряжённого трибоэлемента путём создания микрорельефа, исключаящего процесс микрорезания.

В качестве оптимального минимума воз-

можно использовать только двух ступеней соответствующего технологического процесса 1), 2).

Первая ступень призвана обеспечить с высокой надёжностью требуемую точность размера, включая макроотклонения. Поэтому, учитывая материал образцов и его твёрдость, предварительная обработка поверхностей образцов осуществлялась двумя методами: тонким точением эльбором; круглым шлифованием.

Это обусловлено необходимостью оценки влияния на антифрикционные свойства поверхностей метода предварительной обработки, т.е. технологической наследственности. Оба эти метода позволяют достичь высокой точности и производительности, но имеют «разный технологический почерк».

Условия, при которых выполнялось тонкое точение эльбором:

1) геометрические параметры режущей части резца из эльбора Р : главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 15^\circ$; задний угол $\alpha = 4^\circ$; радиус при вершине режущей части резца $r = 0,1$ мм;

2) режимы резания: глубина $t = 0,2$ мм; подача $S = 0,05$ мм/об; скорость резания $v = 125$ м/мин.

Круглое шлифование проводилось с режимами: скорость круга $v_{кр} = 25$ м/с; скорость вращения детали $v_d = 15$ м/мин; поперечная подача $S_{поп} = 0,02...0,24$ мм; количество рабочих ходов при выхаживании $n = 4...6$.

Качество исходной поверхности оказывает существенное влияние на получение качественных твёрдых износостойких покрытий методом катодно-ионной бомбардировки в вакууме. Основными требованиями к нему являются низкая исходная шероховатость ($Ra < 0,3$ мкм) и максимизация радиусов микровыступов. Такие требования способствуют обеспечению минимизации концентраторов электрических зарядов на обрабатываемой поверхности и, следовательно, повышению равномерности слоя наносимого покрытия по толщине.

Для обеспечения таких условий можно использовать различные технологические методы. Однако, исходя из целесообразности повышения «гибкости» обработки и учитывая высокую твёрдость материала подложки, следует применять для этой цели отделочно-упрочняющую обработку. Такое решение приобретает ещё большую обоснованность, если предположить возможность влияния технологической наследственности на эксплуата-

ционные свойства из-за довольно малой толщины наносимой плёнки.

В данном случае предпочтение получило алмазное выглаживание. Оно наиболее «гибкое» в технологическом отношении и обладает высокой устойчивостью и параметрической надёжностью.

Применение алмазного выглаживания имеет целый ряд преимуществ, по сравнению с другими методами ППД, по следующим причинам:

1. Алмазный индентор обладает значительно более высокой твёрдостью, что уменьшает повышенный износ инструмента из-за высокой твёрдости каплевидных образований на поверхности твёрдого покрытия при применении на стадии финишной обработки (по сравнению с инденторами из закалённой стали (например, роликами или шариками));

2. Основным взаимодействием индентора с обрабатываемой поверхностью при алмазном выглаживании является скольжение, которое является более эффективным для удаления каплевидных образований с обрабатываемой поверхности. При обработке ППД роликами и шариками видом взаимодействия является качение, что может не обеспечить эффективное удаление каплевидных образований с поверхности за счёт эффекта «наезда» и «подскока»;

3. Алмазное выглаживание обладает высокой производительностью, стабильностью процесса, технологической гибкостью и параметрической надёжностью.

Твёрдое покрытие на поверхности вала – это хрупкая оболочка толщиной 2...7 мкм на упруго-пластическом основании. Так как в процессе алмазного выглаживания может возникнуть опасность растрескивания и шелушения покрытия, приводящая к утрате работоспособности обработанной поверхности, необходимо установить верхний предел силы алмазного выглаживания при заданном радиусе индентора, вызывающей растрескивание покрытия.

С точки зрения физики твёрдого тела, отсутствие эффекта растрескивания и отслаивания слоя нанесённого покрытия может быть достигнуто, двумя путями:

1. Отсутствие прогиба поверхностного слоя материала трибоэлемента (подложки) при финишной обработке слоя нанесённого покрытия. В этом случае сила алмазного выглаживания при обработке покрытия (Q_2) должна быть меньше, чем при обработке поверхности под нанесение покрытия (Q_1), т.е. $Q_2 < Q_1$. Это обеспечивает прогиб подложки

под покрытием при его финишной обработке минимальным, так как она уже пластически деформирована и упрочнена при обработке с силой Q_1 .

2. Фиксирование механических свойств самого покрытия, учитывающих его контактную прочность и способность к «охрупчиванию» как самостоятельного физического тела; а также параметров сцепления материала покрытия с подложкой, характеризующих возможность его отслаивания.

Для исследований в этом направлении обработка поверхностей проводилась с последующей электронной микроскопией (ЭМ). Целью последней является определение максимального значения силы алмазного выглаживания по критерию отсутствия микротрещин нанесённого слоя покрытия. ЭМ даёт более полную картину состояния поверхности, в сравнении с профилографированием.

Поверхности образцов с твёрдыми нитридсодержащими покрытиями обрабатывались алмазным выглаживанием, которое выполнялось по схеме (рис. 1). Процесс осуществлялся алмазным выглаживателем с радиусом $r = 3$ мм из материала АСПК со скоростью $v = 12$ м/мин при подаче $S = 0,05$ мм/об. В ка-

честве СОТС использовалось масло «Индустриальное-20».

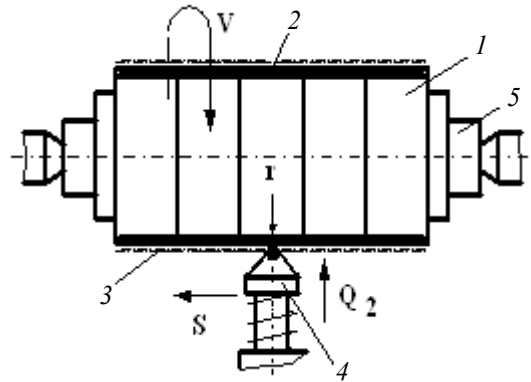


Рис. 1. Схема алмазного выглаживания:

1 – образец (сталь 45; HRC 45...48); 2 – слой твердого покрытия (нитрид титана); 3 – СОТС; 4 – алмазный выглаживатель; 5 – оправка

Результат анализа электронных микрофотографий поверхностей покрытий до (рис. 2) и после (рис. 3) их алмазного выглаживания подтверждает их физическую картину трансформации микрорельефа за счёт удаления каплевидных формообразований.

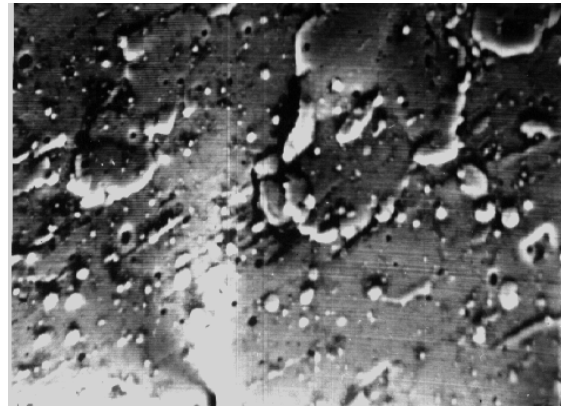
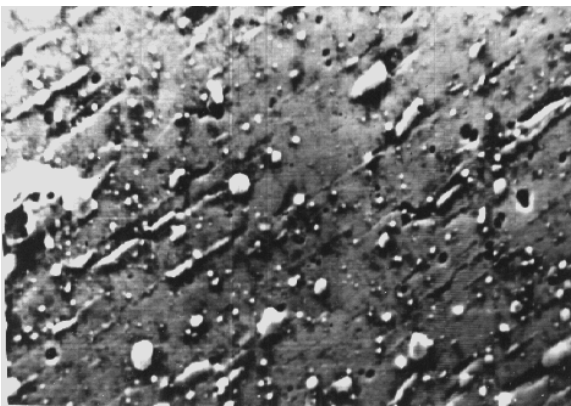


Рис. 2. Электронные микрофотографии участков поверхностей покрытия нитридом титана ($\times 500$)

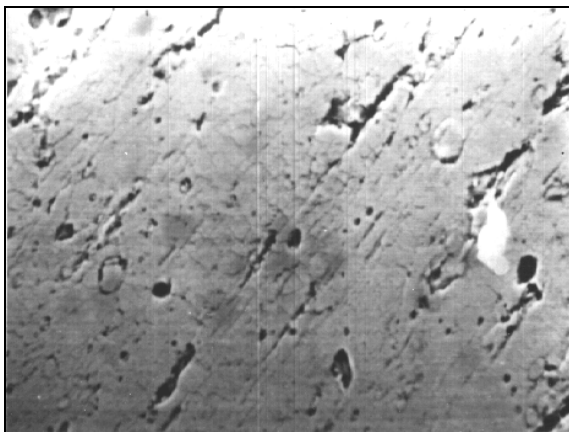
Электронные микрофотографии участков поверхностей с твёрдыми нитридсодержащими покрытиями (см. рис. 3) показывают, что растрескивание твёрдого покрытия имеет место при алмазном выглаживании с силой ≤ 200 Н при радиусе выглаживателя $r = 3$ мм. Таким образом, с некоторым «коэффициентом запаса» можно принять максимально допустимую силу алмазного выглаживания твёрдых нитридсодержащих покрытий при принятой технологии предварительной обработки поверхностей $Q_{\max} = 150$ Н.

Интенсивность изнашивания в этом случае

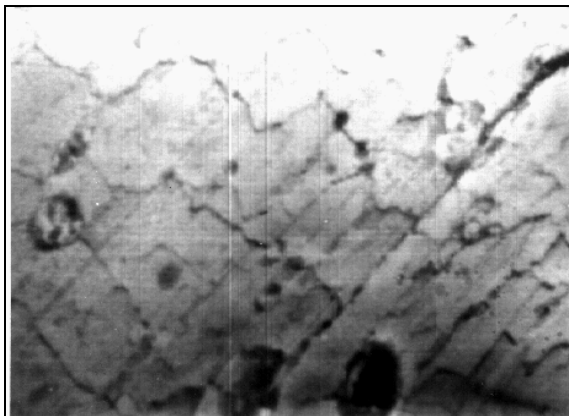
составила $I_h = 0,6 \times 10^{-11}$, что позволяет сделать вывод о высокой эффективности применения твёрдых нитридсодержащих покрытий с их последующим алмазным выглаживанием в парах трения скольжения с целью повышения износостойкости последних.

В целом результаты проведённых экспериментально-теоретических исследований позволили синтезировать технологию антифрикционной обработки на основе нанесения твёрдых нитридсодержащих покрытий (рис. 4). На рис. 4 приняты следующие обозначения: v , S , Q – скорость обработки, подача и сила алмаз-

ного выглаживания соответственно; X_i – вектор входных переменных для технологической подсистемы i -го уровня, элементами которого являются параметры качества поверхности, полученные на $(i-1)$ уровне; X_{pi} – вектор рабочих переменных для технологической подсистемы i -го уровня, элементами которого являются режимы обработки и геометрия обрабатываемого инструмента; Y_i – вектор выходных переменных технологической подсистемы i -го уровня, элементами которого являются параметры качества поверхности, полученные в результате обработки на i -м уровне при векторах входных переменных X_i и X_{pi} .



а)



б)

Рис. 3. Результаты электронно-микроскопических исследований поверхностей образцов с твёрдыми нитридсодержащими покрытиями после алмазного выглаживания:

а – при $Q_2 = 150$ Н при $(\times 500)$; б – $Q_2 = 200$ Н $(\times 600)$

Сущность антифрикционной обработки на основе нанесения твёрдых нитридсодержащих покрытий заключается в нанесении на предварительно подготовленную поверхность твёрдого нитридсодержащего покрытия и его последующее алмазное выглаживание с целью

формирования параметров микропрофиля, удовлетворяющих условию пластического отеснения материала сопряжённого контртела в процессе трения. Компоненты выхода 4-го (см. рис. 4) уровня во многом определяют эксплуатационную надёжность того или иного узла, так как являются общими компонентами выхода технологической системы ($\bar{Y}_4 = \bar{Y}$) и, соответственно, компонентами векторов входа для систем эксплуатации (трибомеханические и др.).

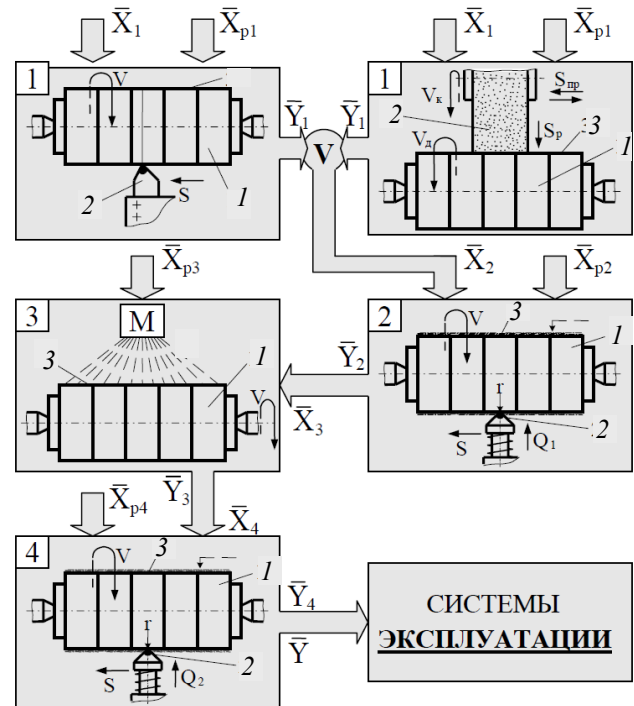


Рис. 4. Технология антифрикционной обработки на основе нанесения твёрдых нитридсодержащих покрытий:

1 – образцы; 2 – инструмент (резец, оснащённый эльбором Р; шлифовальный круг; алмазный выглаживатель); 3 – обрабатываемая поверхность

Таким образом, технологический процесс предложенной антифрикционной обработки включает в себя следующие операции:

1. Предварительная обработка функциональной поверхности вала с целью обеспечения точности сопряжения поверхностей в узлах типа подшипников скольжения (точение эльбором или круглое шлифование);

2. Алмазное выглаживание с силой Q_1 при радиусе индентора $r = 3$ мм для подготовки поверхности под нанесение покрытия в соответствии с требованиями соответствующих технологий;

3. Непосредственно нанесение твёрдого покрытия (TiN или MoN) методом катодно-

ионной бомбардировки в вакууме по специальной технологии;

4. Алмазное выглаживание поверхности с силой Q_2 при радиусе индентора $r = 3$ мм для формирования заданных триботехнических характеристик пары трения скольжения.

Формирование параметров качества поверхности твёрдых покрытий при обработке ППД и управление, посредством этого, износостойкостью сопряжённого контртела является весьма актуальной задачей.

Покрытия КИБ являются мощным средством современной инженерии поверхностей. Этот метод даёт возможность изучения взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин с параметрами качества их рабочих поверхностей, исследования изменения качества поверхностного слоя деталей машин при их эксплуатации, формирования параметров качества поверхностного слоя деталей при различных методах их обработки, технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей, технологического обеспечения и повышения эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, исследования надёжности технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин [4].

Твёрдые покрытия на поверхностях трения, получаемые методом КИБ, в сочетании с их последующей отделочно-упрочняющей обработкой методами ППД (в частности, алмазным выглаживанием), являются основой для разработки высокоэффективной антифрикционной обработки поверхностей трения скольжения деталей машин.

Анализируя особенности воздействия технологических процессов обработки дета-

лей машин на их эксплуатационные свойства, в частности, на их износостойкость, можно выделять области рационального применения перспективных технологий в зависимости от функционального назначения обрабатываемых деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. **Суслов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. **Крагельский, И.В., Добычин, М.Н., Комбалов, В.С.** Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
4. **Нагоркин, М.Н., Фёдоров, В.П., Моргаленко, Т.А., Тотай, А.В.** Прогнозирование и диагностика технологических и триботехнологических систем на основе теории информации // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 3(39). – С. 134-140.

REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / Authors' group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
2. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
3. Kragelsky, I.V., Dobychin, M.N., Kombalov, V.S. *Fundamentals of Friction and Wear Calculations*. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 526.
4. Nagorkin, M.N., Fyodorov, V.P., Morgalenko, T.A., Totay, A.V. Prediction and diagnostics of technological and tribotechnological systems based on information theory // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2013. – No.3(39). – pp. 134-140.

Рецензент д.т.н. В.П. Фёдоров