

Таким образом, на основании проведенных исследований установлены закономерности формирования геометрической структуры и микротвердости поверхностей деталей из антифрикционного чугуна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Narzędzia skrawające. Katalog główny firmy SANDVIK Coromant, 2007. 2. Narzędzia do toczenia. Katalog Generalny MITSUBISHI, 2007.

УДК621.793.1

Фролов И.С., Иващенко С.А., Мрочек Ж.А

КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОСОБЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышение надежности и долговечности машин и механизмов является важной народнохозяйственной задачей. Наиболее эффективный метод решения такой задачи заключается в увеличении ресурса работы лимитирующих деталей и узлов. Последнее особенно актуально, если эти узлы и детали работают в особых условиях. Под особыми условиями эксплуатации понимается: воздействие агрессивных сред, работа в вакууме, воздействие электромагнитного излучения, высокие температуры и удельное давление, трение без смазочного материала и др. В таких условиях работают изделия электронного приборостроения, судостроения, космонавтики, транспортного и энергетического машиностроения, химической промышленности и ряда других отраслей.

Естественно, что для обеспечения особых условий эксплуатации деталей и механизмов их рабочие поверхности должны обладать специальными физико-механическими свойствами: коррозионной стойкостью, вакуумной плотностью, теплостойкостью, износостойкостью, твердостью, контактной жесткостью и др. Создание этого комплекса свойств возможно формированием на рабочих поверхностях деталей многофункциональных покрытий, которые благодаря оптимальному сочетанию технологических, конструкционных и эксплуатационных параметров могут обеспечить получение изделий с требуемыми и прогнозируемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Анализ методов формирования покрытий, а также результаты экспериментальных исследований показывают, что наиболее перспективным для этих целей является вакуумно-плазменный электродуговой способ. В основе этого способа лежат процессы испарения под действием стационарной вакуумной дуги материала катода с одновременной ионизацией паров и формирования покрытий при взаимодействии плазменного потока с поверхностью изделия. Им получают в основном монослойные покрытия на основе карбидов, нитридов, карбонитридов тугоплавких металлов IV–VI групп Периодической системы элементов [1].

Однако использование монослойных покрытий из одного тугоплавкого соединения не всегда удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к многофункциональным покрытиям. Поэтому в качестве многофункциональных все большее применение находят композиционные покрытия различного типа, обладающие улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. К таким покрытиям относятся мультислойные покрытия переменного состава и, в частности, полосчатые покрытия.

Эти покрытия, представляют собой чередование мультислойных полос (участков) из износостойкого и антифрикционного материалов и сочетающие в себе преимущества мультислойных покрытий постоянного состава и обычных полосчатых покрытий. В качестве антифрикционного материала может использоваться медь, бронза и некоторые другие пластичные металлы.

Расположение полос из антифрикционного материала зависит от формы поверхности, типа движения в паре трения (возвратно-поступательное или вращательное) и направления вектора скорости относительного скольжения (рис. 1). Для плоских деталей при возвратно-поступательном движении полосы располагают параллельно друг другу в направлении, перпендикулярном вектору скорости относительного скольжения. Для деталей больших габаритов, длина и ширина которых соизмеримы, может использоваться шахматная схема расположения антифрикционных полос. В случае вращательного движения плоской поверхности полосы целесообразно располагать радиально относительно оси вращения изделия. Для деталей типа тел вращения при возвратно-поступательном движении в паре трения полосы наносятся в виде колец, а при вращательном движении – в виде полос, перпендикулярных вектору скорости относительного скольжения.

Относительно пластичные полосы из антифрикционного материала выполняют роль температурных барьеров и одновременно являются демпферами, компенсирующими увеличение или уменьшение линейных размеров покрытия при его остывании под влиянием разных коэффициентов термического расширения покрытия и основы, а также изменение объема конденсата вследствие происходящих в нем субструктурных изменений.

Формирование полос покрытия осуществляется с помощью накладных масок (или экранов специальных устройств) с прорезями соответствующих размеров. Наряду с функцией формообразования, маски выполняют роль холодильных элементов, обеспечивая дополнительный отвод теплоты от поверхности детали и снижая тем самым интегральную температуру поверхности.

Для особых условий эксплуатации были предложены полосчатые покрытия типа Cu-TiN, представляющие собой чередование мультислойных полос этих материалов [2]. Осаждение Cu проводилось при токе дуги 115 А и напряжении на подложке 100 В. В качестве материала катода использовалась медь М0 ГОСТ 859-78. Формирование полос покрытия на образцах осуществлялось при помощи накладных масок.

Исследование структуры полос меди показало, что она не зависит от толщины слоя покрытия. При всех толщинах имеет место мелкодисперсная структура без преимущественного направления роста кристаллитов, что подтверждается [3]. Микротвердость полос меди также не зависит от толщины слоя покрытия и составляет $(1,35...1,38) \times 10^3$ МПа. Поэтому толщина нанослоев Cu в мультислойных покрытиях $(\text{Cu-TiN})_x$ принималась равной толщине слоев TiN. Наличие полос меди в покрытии обеспечивает поступление твердой смазки в зону трения и, как следствие, повышает износостойкость упрочненной детали в условиях трения без смазочного материала за счет реализации ротапонтного метода смазывания.

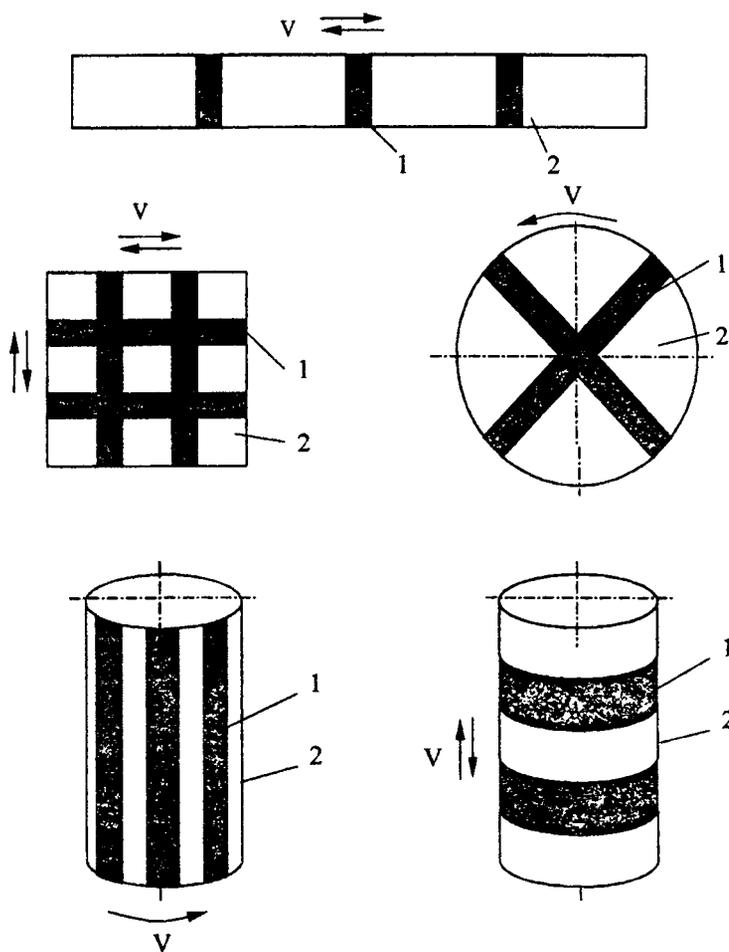


Рис. 1 Схемы расположения полос из антифрикционного материала в полосчатом покрытии: 1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал

Для формирования мультислойных полосчатых покрытий типа Cu-TiN была разработана технология поочередно-послойного их нанесения в вакууме.

Данная технология заключается в том, что участки из различных материалов получают путем многократного поочередного нанесения слоев материалов при периодическом движении поверхности детали между катодами – испарителями из наносимых материалов, работающими в импульсном режиме.

Продолжительность паузы между импульсами двух соседних в направлении движения поверхности детали катодов-испарителей из наносимых материалов определяется из соотношения:

$$A = t_d + (t_{отк} - t_d) \cdot K,$$

где t_d – время на перемещение детали между двумя соседними катодами-испарителями из наносимых материалов, с;

$t_{отк}$ – время, необходимое для откачки вакуумной камеры после нанесения слоя покрытия, с;

K – безразмерный коэффициент, принимающий следующие значения:

при $t_{отк} - t_d > 0$ $K=1$,

при $t_{отк} - t_d \leq 0$ $K=0$.

Продолжительность паузы между импульсами каждого катода-испарителя из наносимых материалов определяется из соотношения:

$$t_n = \sum_{i=1}^{m-1} t_{ui} + \sum_{j=1}^n A_j,$$

где t_{ui} – продолжительность работы i -го источника наносимых материалов, с;

A_j – продолжительность j -ой паузы между импульсами, с;

m – количество источников наносимых материалов;

n – количество перемещений детали между источниками наносимых материалов за один цикл нанесения покрытия.

Продолжительность паузы между импульсами двух соседних катодов-испарителей источников наносимых материалов A_j – это время между окончанием работы одного катода-испарителя и включением соседнего. Время, необходимое для откачки вакуумной камеры после нанесения слоя покрытия $t_{отк}$, является технологическим параметром установок вакуумно-плазменного нанесения покрытий. Поэтому после окончания работы катода-испарителя необходима откачка вакуумной камеры для достижения оптимального давления.

Количество m катодов-испарителей из наносимых материалов и количество n перемещений детали между ними являются взаимосвязанными параметрами, т.е. $n=f(m)$. Причем их соотношение зависит от схемы движения детали между катодами-испарителями. Например,

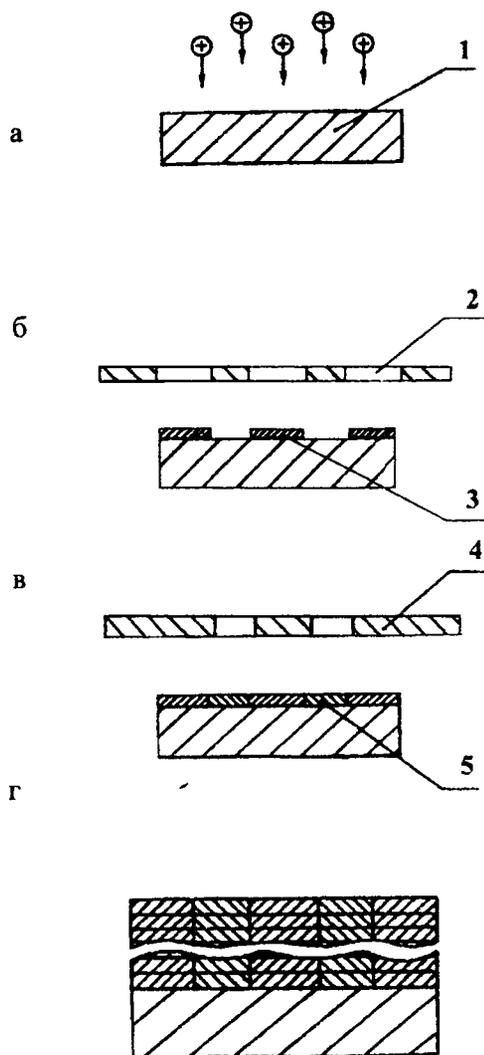


Рис. 2 Схема последовательности получения мультислойного полосчатого покрытия на плоских деталях:

- а – ионная бомбардировка поверхности основы 1;
- б – нанесение через экран-маску 2 полос износостойкого материала 3;
- в – нанесение через экран-маску 4 полос антифрикционного материала 5;
- г – конструктивная схема мультислойного полосчатого покрытия

при циклическом линейном или круговом движении (деталь после прохождения последней позиции возвращается к первой) $n=m$, а при линейном движении детали (после прохождения последней позиции деталь возвращается к первой, проходя через все позиции в обратном порядке) $n = 2m - 1$.

Последовательность получения мультислойного полосчатого покрытия показана на рис. 2. Толщина слоя покрытия, наносимого за один цикл, должна лежать в строго определенных пределах. При этом нижний предел определяется толщиной нескольких атомарных слоев (2-3 и более), позволяющих обеспечить сплошность покрытия. Верхний предел толщины слоя для металлов IV–VI групп таблицы Менделеева и их карбидов, нитридов и карбонитридов равен $220-250a$, где a – период кристаллической решетки. При превышении этой толщины происходит формирование зерен с размерами, превышающими оптимальные для износостойких покрытий (1000–1500 Å). Такой рост зернистости приводит к образованию неблагоприятной структуры покрытия с большими напряжениями между крупными кристаллами. В результате, покрытия имеют пониженную прочность сцепления с основой, а устойчивость крупных зерен к распространению микротрещин при механических воздействиях является невысокой.

Исходя из этого, продолжительность работы (импульса) каждого катода-испарителя в вакуумной камере установки наносимых материалов определяется по формуле:

$$t_u = \frac{60h}{\Pi} ,$$

где h – толщина слоя покрытия, обеспечивающая получение мелкозернистой структуры с неупорядоченно-ориентированными зернами для данного материала, мкм;

Π – производительность установки при нанесении слоя данного материала, мкм/мин.

Величины h и Π определяются экспериментально или по литературным данным. Варьируя толщиной слоя h в допустимых пределах, можно получить слои различных материалов, наносимые в одном цикле, либо одинаковой, либо различной толщины в зависимости от требований, предъявляемых к геометрии покрытия.

Периодическое движение детали между катодами-испарителями из наносимых материалов, согласованное с импульсным режимом их работы строгой математической зависимостью, позволяет обеспечить необходимую

точность процесса нанесения покрытия с участками из различных материалов по предлагаемой технологии при любых схемах движения детали между катодами, а также избежать перегрева и нежелательных структурных превращений материала основы; уменьшить внутренние напряжения в покрытии. Все это способствует увеличению износостойкости детали и улучшению ее эксплуатационных свойств.

Однако комплексные износные испытания мультислойных полосчатых покрытий $(Cu-TiN)_x$ выявили некоторую нестабильность их фрикционных характеристик вследствие более интенсивного изнашивания полос антифрикционного материала в условиях трения без смазочного материала. Это приводит к дефициту смазочного материала в паре трения и, как следствие, увеличению момента и коэффициента трения.

Для устранения этого недостатка была разработана схема ступенчато-полосчатого покрытия типа $Cu/TiN-TiN/Cu$ и технология получения его в вакууме. Данная технология заключается в том, что каждую из полос покрытия выполняют путем многократного последова-

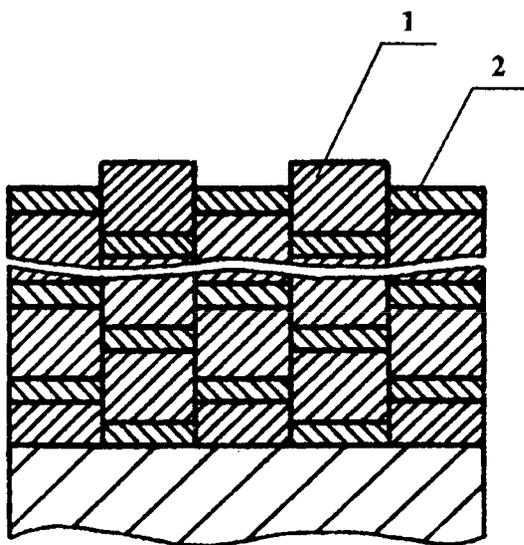


Рис.3. Схема мультислойного ступенчато-полосчатого покрытия:

1 – антифрикционный материал;

2 – износостойкий материал

тельного нанесения слоев из износостойкого и антифрикционного материалов (АМ), при этом из двух любых соседних полос одну наносят, начиная со слоя АМ, а другую – со слоя износостойкого материала (ИМ). Схема мультислойного ступенчато-полосчатого покрытия представлена на рис. 3, а последовательность получения этого покрытия — на рис. 4.

Толщины слоев из АМ и ИМ выбираются исходя из величины их часового износа в моно-слойном полосчатом покрытии. При этом оптимальный диапазон толщин слоев этих материалов составляет от одной до пяти величин их часового износа, а для того, чтобы слои из ИМ и АМ в любых соседних полосах изнашивались одновременно, величина часового износа материалов в слое покрытия принимается одинаковой для ИМ и АМ. При толщине слоя менее одной величины часового износа значительно уменьшается производительность, и покрытие обладает невысокими механическими свойствами.

При толщине слоев из ИМ и АМ более пяти величин их часового износа происходит формирование столбчатой крупнозернистой структуры покрытия, характеризующейся низкой адгезией и имеющей склонность к растрескиванию при механических воздействиях. Это приводит к снижению износостойкости покрытия. Толщина h_1 первого слоя АМ в полосах, начинающихся с этого материала, определяется зависимостью $h_1 = (0,65...0,85)h$, где h — толщина всех последующих слоев АМ (мкм) и обеспечивает превышение слоев АМ над соседними слоями ИМ. Она определяется, исходя из двух критериев: получения частично-регулярного микрорельефа поверхности с определенной высотой регулярных микронеровностей и объема АМ, необходимого как для качественной приработки упрочненной поверхности в начальный период эксплуатации, так и для стабильного поступления его в пару трения во время всего срока службы детали.

При толщине первого слоя из АМ более $0,85h$ объем твердой смазки, поступающий в пару трения, оказывается недостаточным, что приводит к схватыванию и заеданию контактирующих поверхностей, сопровождающемуся частичным разрушением покрытия, особенно при быстром нагружении пары трения. При толщине первого слоя из АМ менее $0,65h$ значительно возрастает расход АМ и уменьшается срок службы упрочненной детали из-за большой скорости изнашивания покрытия.

При определении величины h_1 меньшие значения принимаются для случая трения без смазочного материала, а большие значения – для граничного трения, а также трения со смазочным материалом. Полученное значение h_1 корректируется таким образом, чтобы превышение антифрикционных слоев над соседними износостойкими соответствовало ближайшему значению высоты регулярной микронеровности по ГОСТ 24773-81.

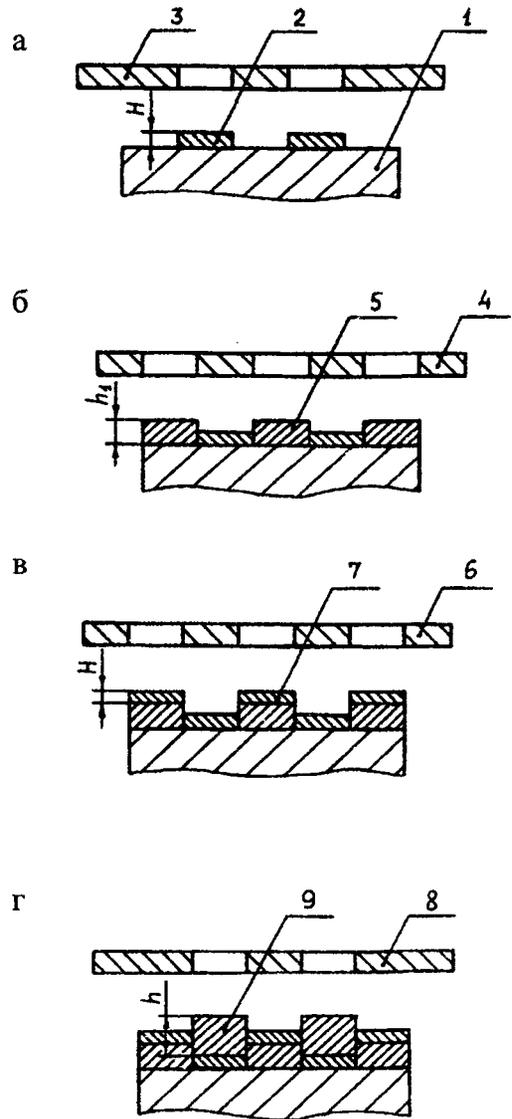


Рис. 4. Схема последовательности получения мультислойного ступенчато-полосчатого покрытия на плоских деталях:
 а – нанесение через экран-маску 3 на основу 1 полос износостойкого материала 2 толщиной H ;
 б – нанесение через экран-маску 4 полос антифрикционного материала 5 толщиной h_1 ;
 в – нанесение через экран-маску 6 полос износостойкого материала 7 толщиной H ;
 г – нанесение через экран-маску 8 полос антифрикционного материала 9 толщиной h

Выполнение каждой из полос покрытия путем многократного последовательного нанесения слоев из ИМ и АМ значительно снижает скорость изнашивания по сравнению с монослойным полосчатым покрытием, а сочетание такого чередования с тем, что из двух любых соседних полос нанесение одной полосы начинают со слоя АМ, а второй – со слоя ИМ, обеспечивает формирование ступенчато-полосчатой конструкции покрытия, которая обладает свойством самовосстанавливаться после изнашивания каждого слоя покрытия.

Свойство самовосстановления заключается в том, что после изнашивания первого слоя покрытия (слои из ИМ и АМ изнашиваются практически одновременно, так как их толщина равна одинаковому числу величин часового износа) конструкция покрытия остается такой же, как и до изнашивания, только на месте износостойкого слоя будет антифрикционный слой и наоборот.

В целом, благодаря стабильному поступлению твердой смазки в пару трения и формированию регулярного микрорельефа на поверхности упрочненной детали, мультислойное ступенчато-полосчатое покрытие, в частности предложенное покрытие (Cu/TiN-TiN/Cu)_x, обеспечивает существенное увеличение износостойкости в условиях трения без смазочного материала или при ограниченном поступлении смазки в пару трения. Кроме того, данное покрытие обеспечивает повышение износостойкости и при трении со смазочным материалом за счет формирования масляных карманов, образующихся при более быстром изнашивании антифрикционных слоев и удерживающих смазку в паре трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. — М.: Машиностроение, 1986. — 192 с.
2. Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Иващенко С.А. Повышение триботехнических характеристик деталей из немагнитных материалов нанесением композиционных вакуумно-плазменных покрытий // Материалы международной 53-й науч.-техн. конф. проф., препод., научн. работн. и аспирантов Белорус. госуд. политехн. академии: В 4-х ч. - Минск, 1999. - Ч. 1 - С. 179.
3. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. - М.: Машиностроение, 1976. — 368 с.

УДК 621.91

Чарторийский А. В., Шагун В.И., Руцкий Я.С., Алтунин С.В., Душутин А.В.

ВНЕДРЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ РУПП «БЕЛАЗ»

*ООО «ИТЦ Технополис» Минск, Беларусь
РУПП «Белорусский автомобильный завод», Жодино, Беларусь
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

На территории Республики Беларусь на сегодняшний день представлено достаточно большое количество мировых производителей металлорежущего инструмента.

На наш взгляд, ведущие мировые производители режущего инструмента подошли к некоему пределу качества. И теперь все большее значение приобретает техническая поддержка, то есть способность компании-продавца произвести оптимальный подбор инструмента под конкретные технологические потребности заказчика.

При обработке закаленных материалов лучше подходят пластины наибольшего размера с большим радиусом при вершине. В случае малой жесткости технологической системы подходят шлифованные пластины. Для прерывистого резания или перерезания стружки используют тяжелые пластины из более прочного сплава. При нестабильных условиях работы рекомендуются фрезы с крупным и средним шагом.