

УДК 621.787.6

М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДЕФОРМАЦИОННЫМ ПЛАКИРОВАНИЕМ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

Одним из эффективных путей повышения надежности узлов трения машин и механизмов является нанесение на рабочие поверхности трущихся деталей защитных покрытий [1, 2]. Защитные покрытия, наряду со смазочным материалом, в определенном интервале нагрузок и температур предохраняют поверхности трения от непосредственного соприкосновения, улучшают условия их фрикционного взаимодействия, сокращают время приработки, снижают потери на трение, предотвращают схватывание и заедание при ужесточении режимов трения и др. Кроме того, во многих случаях, благодаря нанесению покрытий на детали из обычных конструкционных сталей, экономятся дорогостоящие материалы, стали и сплавы [1-3].

В современном машиностроении известно большое количество методов и средств нанесения покрытий. Вместе с тем, задача разработки недорогих, но достаточно эффективных технологий нанесения покрытий не потеряла своей актуальности и в настоящее время. К одной из таких технологий следует отнести технологию деформационного плакирования гибким инструментом, где в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка с проволочным ворсом, а в качестве плакирующего материала - различные материалы металлического и неметаллического происхождения, в зависимости от назначения покрытий [4, 5]. Для ее реализации не требуются затраты на дорогостоящее оборудование. Технология экологически чиста и безопасна, и, кроме того, после нанесения покрытий на поверхность детали последующей механической обработки не требуется, что дает возможность применять ее для финишной обработки деталей машин.

В известных к настоящему времени публикациях о покрытиях, нанесенных щетками, рассмотрены, в основном, вопросы формирования и исследования работоспособности однослойных покрытий из металлических медьсодержащих и неметаллических полимерных материалов. Показана высокая эффективность их применения для повышения износостойкости узлов трения машин. Вместе с тем, данных о возможности формирования с помощью щеток композиционных покрытий, содержащих в металлической матрице компоненты неметаллического происхождения, например, графит, дисульфид молибдена, фторопласт и др. материалы, различных размерных фракций и концентраций, в том числе и наноразмерного уровня, в известных публикациях не приводится. Учитывая, что в области материаловедения в последние десятилетия проводятся интенсивные исследования по созданию подобных материалов, представляют интерес и исследования, связанные с созданием и изучением эксплуатационных характеристик аналогичных композиционных покрытий. В особенности, если для этого используется недорогое технологическое оборудование.

Целью настоящих исследований явилось изучение возможности формирования композиционных покрытий с наполнителями различной природы на рабочих поверхностях деталей триботехнического назначения с помощью вращающейся металлической щетки и исследование триботехнических характеристик сформированных покрытий.

При разработке методики эксперимента учитывали то, что из материалов, используемых для подшипников скольжения различных машин и механизмов, наиболее широкое распространение получила медь и сплавы на ее основе. Поэтому медь и была выбрана в качестве основного материала для нанесения покрытия. В качестве наполнителей использовали порошок графита и ультрадисперсную графитоалмазосодержащую шихту (УДА) производства НПО «Синта» (Беларусь) с размерностью частиц в пределах 100 нанометров (нм). По специально разработанной методике на плоской поверхности дисков-образцов из стали 08кп (HV 90) с помощью вращающейся металлической щетки [6] формировали однослойные и двухслойные композиционные покрытия. Однослойные покрытия состояли из композиций двух видов: медь – графит и медь – УДА. Двухслойные покрытия формировали с учетом результатов ранее выполненных исследований, согласно которым нанесение поверх медного покрытия слоя из многокомпонентного сплава на основе меди, олова, свинца и цинка повышало устойчивость к заеданию пары трения [7]. В настоящих исследованиях поверх однослойных композиций также наносили вышеуказанный сплав, а в качестве наполнителя использовали графит. После нанесения покрытий дополнительной механической обработки не проводилось. Среднее значение параметра шероховатости Ra поверхности образцов с покрытиями составляло 0,55...0,9 мкм. Толщина покрытий не превышала 2...3 мкм.

Исследования по оценке изнашивания и определению критической нагрузки, вызывающей схватывание и заедание пар трения с композиционными покрытиями, выполняли на триботехнической установке, осуществляющей трение торцовых поверхностей трех роликовых образцов из стали ШХ15 (HRC 60...63) по плоской поверхности диска-контробразца с нанесенным покрытием. Скорость относительного скольжения трущихся поверхностей составляла 7 м/с. При этом первоначально выполнялась приработка образцов в течение 30 мин при удельной нагрузке 0,5 МПа, затем ступенчатое нагружение до возникновения заедания. До значения удельной нагрузки 1,5 МПа величину силового воздействия увеличивали на 0,5 МПа, а после – на 0,25 МПа. Продолжительность испытаний на каждой ступени нагружения составляла 5 мин. Смазывание дорожки трения на диске производили с помощью фитиля, пропитываемого маслом M10B. Контурная площадь поверхности взаимного прилегания образцов при установке на машину трения согласно требованиям ГОСТ 23.224-86 составляла не менее 90%.

**В ХОДЕ ИСПЫТАНИЙ РЕГИСТРИРОВАЛИ МОМЕНТ ТРЕНИЯ И ПРИРОСТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА И КОНТРОБРАЗЦА ОТ НАЧАЛА ДО ЗАВЕРШЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА КАЖДОЙ СТУПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ. ИЗНОС ДИСКОВ И РОЛИКОВ ОЦЕНИВАЛИ МЕТОДОМ ВЗВЕШИВАНИЯ НА АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСАХ ВЛА-200 ГОСТ 24104-2001 В КОНЦЕ КАЖДОГО ЦИКЛА ИСПЫТАНИЯ. ПЕРЕД ВЗВЕШИВАНИЕМ ОБРАЗЦЫ ПРОМЫВАЛИ В АЦЕТОНЕ СОГЛАСНО ГОСТ 2603-79, А ЗАТЕМ ВЫСУШИВАЛИ НА ВОЗДУХЕ.**

Полученные значения суммарного износа и критических нагрузок, повлекших заедание испытываемых образцов, для разного вида композиционных покрытий приведены в таблице. В графе «Критическая нагрузка» в числителе указано значение нагрузки, а в знаменателе – продолжительность работы пары трения при этой нагрузке.

Как видно из таблицы, покрытия, содержащие в своем составе УДА, более устойчивы к заеданию, нежели покрытия, содержащие в качестве наполнителей графит. Это подтверждает результаты исследований других авторов, показывающих значительное улучшение эксплуатационных свойств покрытий, полученных методами гальванического осаждения, за счет введения в их состав ультрадисперсных частиц на

основе алмазов детонационного синтеза [8, 9]. Вместе с тем, процессы трения исследуемых образцов имеют сложный характер и протекают неодинаково.

Таблица

## Критические нагрузки композиционных покрытий.

Покрытие	Число циклов нагружения	Суммарный износ образцов, мг	Критическая нагрузка, МПа / Продолжительность работы, мин
Без покрытия [9]	359447	-	2,1/1,08
Медь - графит	532974	7,05	3,42/1,8
Медь - УДА	743574	3,45	3,68/2,3
Медь-графит-композит-графит	491400	12,1	2,89/3,0
Медь-УДА-композит-графит	819647	14,2	5,26/0,08

На рис.1 представлена диаграмма, иллюстрирующая изменение коэффициента трения роликов из стали ШХ15 от нагрузки при трении по композиционным покрытиям. На диаграмме четко выделены три зоны, характеризующие трение испытываемых образцов. Это зоны приработки, стабильного трения и нестационарного трения. В зоне приработки (при нагрузке 0,53 МПа) коэффициент трения к концу приработочного цикла снижается с 0,1 до 0,03. В зоне стабильного трения, ограниченного нагрузочным интервалом от 0,53 до 2,09 МПа, коэффициент трения практически мало изменяется и находится, в зависимости от вида покрытия, в пределах 0,005...0,028. Только у образца с двухслойным покрытием «медь+графит – композит+графит» к концу испытаний при нагрузке 2,09 МПа коэффициент трения возрастает с 0,026 до 0,058.

О стабильности процессов трения в указанном нагрузочном интервале свидетельствует и диаграмма изменений температуры испытываемых пар трения в зависимости от нагрузки, представленная на рис.2.

Несмотря на тенденцию к увеличению скорости нагрева трущихся образцов с повышением нагрузки, прирост температуры в этом интервале нагрузок не превышает 20 °С.

Необходимо отметить, что исследуемые композиционные покрытия показали хорошую работоспособность при нагрузке 2,09 МПа, в то время как для ряда покрытий из обычных медьсодержащих материалов, включая и образец без покрытия, эта нагрузка оказалась критической [7].

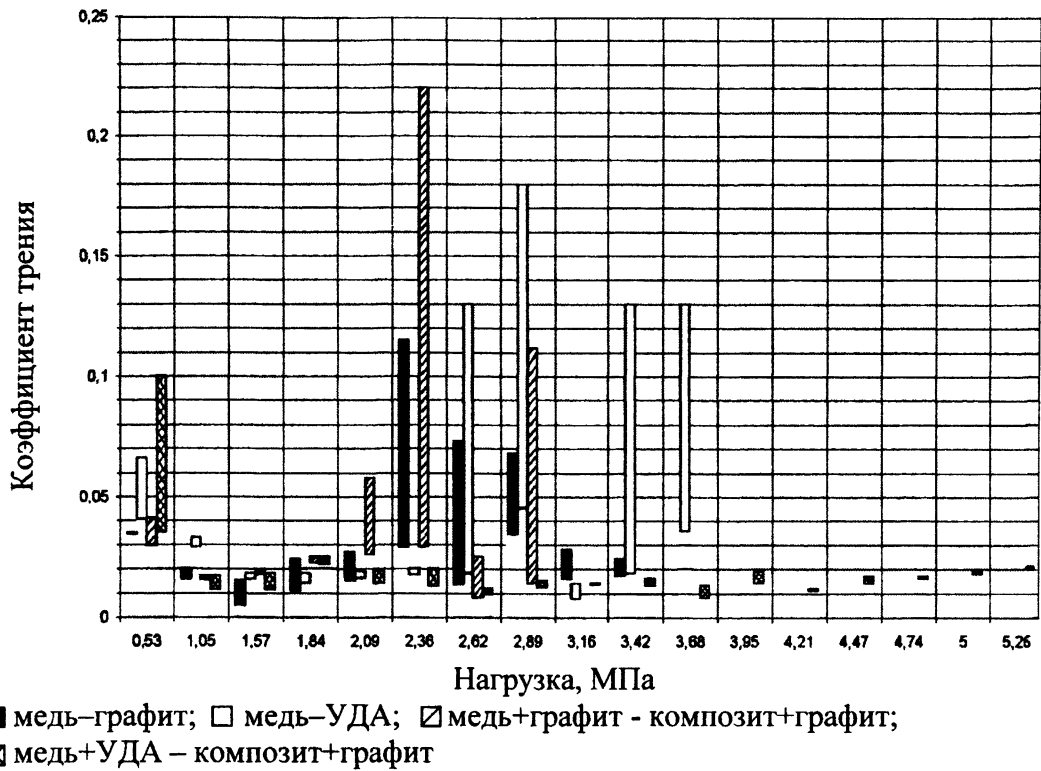


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения роликов из закаленной стали ШХ15 от нагрузки при трении по диску с композиционными покрытиями

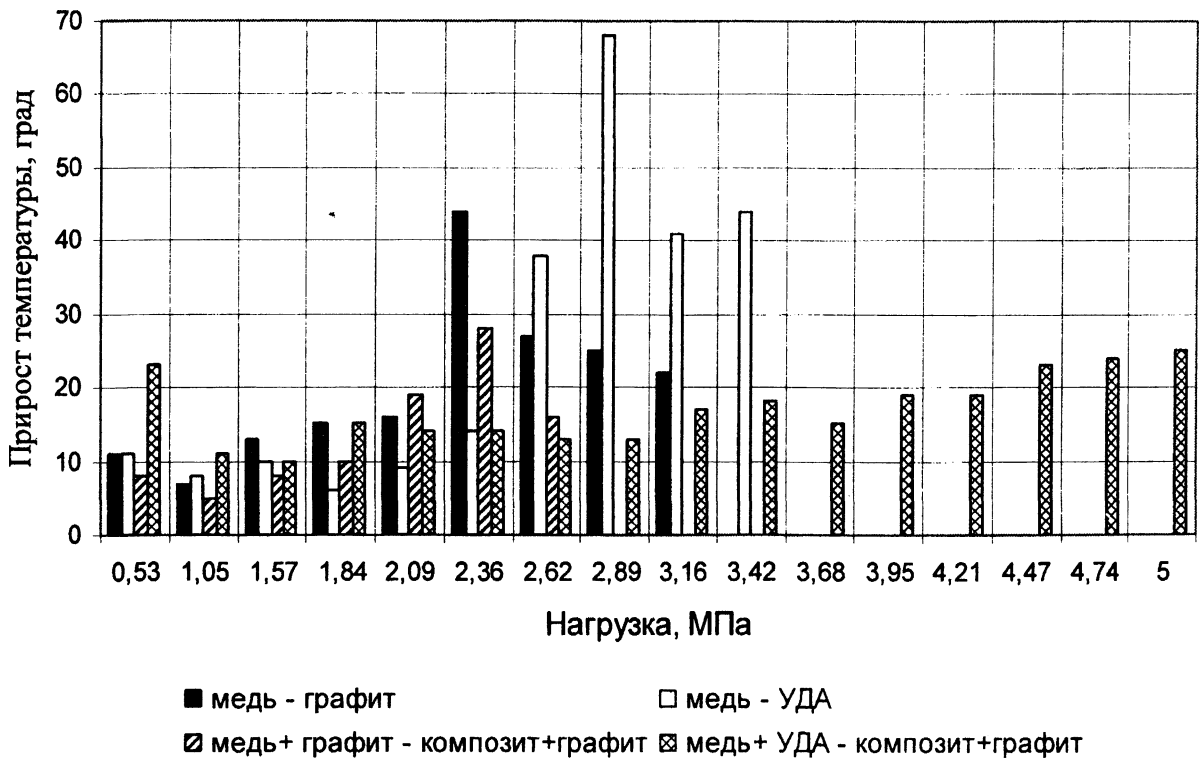
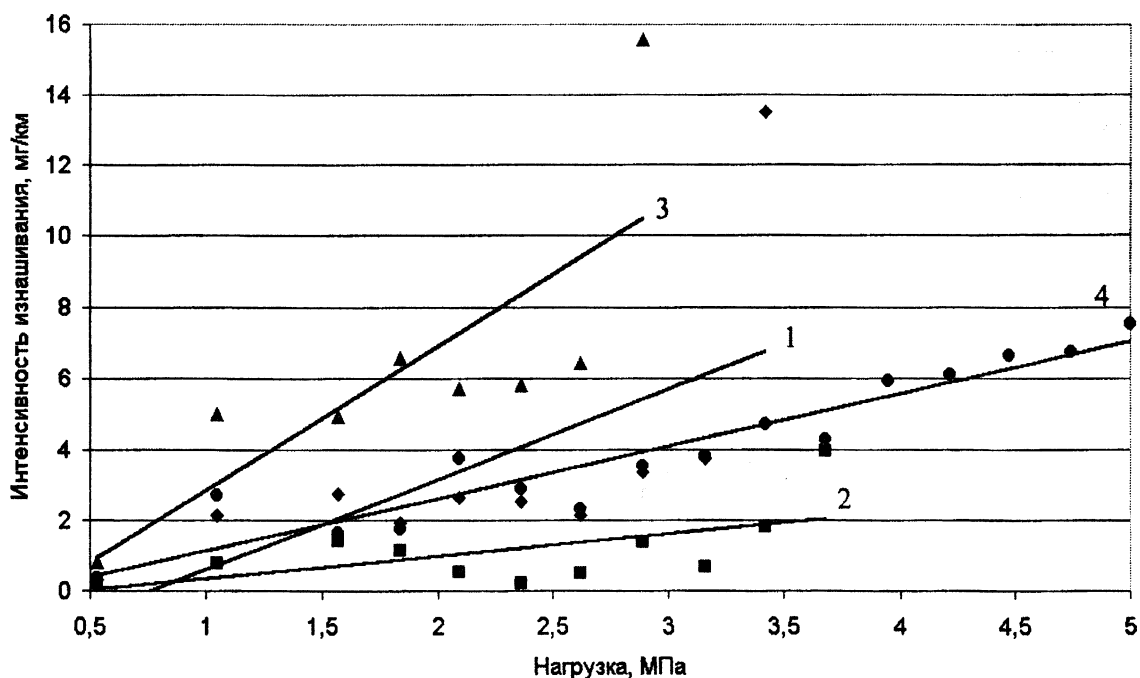


Рис. 2. Зависимость прироста температуры от нагрузки

Изменения значений коэффициента трения за цикл испытаний на определенной ступени нагружения (рис.1) объясняются следующим. В начальный период испытаний войлочная прокладка, используемая в качестве смазочного фитиля, обильно пропитана маслом, которое также присутствует и на дорожке трения диска. Поэтому начальные значения коэффициентов трения, ввиду наличия стабильной смазочной пленки на поверхности дорожки трения, минимальны. Далее излишки масла под действием центробежных сил слетают с поверхности вращающегося диска, а толщина оставшейся масляной пленки преимущественно зависит от маслоудерживающих свойств материала покрытия и прикладываемых нагрузок. При нагрузке 2,09 МПа смазочная пленка чрезвычайно тонка. Сплошность ее нарушается, и режим трения имеет переходной характер от «граничного» к «сухому». Этим можно объяснить возникновение заедания у покрытий из обычных медьсодержащих материалов [7]. При дальнейшем увеличении нагрузки вследствие сближения контактирующих поверхностей нарушение сплошности масляной пленки прогрессирует. Процесс трения нестабилен, а изменение значений коэффициента трения за цикл испытаний в зависимости от свойств материала покрытия может быть существенным. В этих условиях, как видно из рис.1, 2, композиционные покрытия ведут себя неодинаково. Обращает на себя внимание тот факт, что покрытия, содержащие УДА, хотя и более устойчивы к заеданию, могут в зависимости от нагрузки, соответственно и условий трения, проявлять как антифрикционные, так и фрикционные свойства. В частности, однослойное покрытие медь-УДА в диапазоне нагрузок 1,05...2,36 МПа показывало хорошие антифрикционные свойства. Но уже при нагрузке 2,62 МПа эти свойства резко ухудшились. Повысились коэффициент трения и тепловыделение в зоне трения образцов. Испытания закончились тем, что при нагрузке 3,42 МПа один из роликов приварился к поверхности диска.



◆ 1 - медь-графит ■ 2 - медь-УДА ▲ 3 - медь-графит-композит-графит ● 4 - медь-УДА-композит-графит

Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания испытываемых образцов от нагрузки

Анализ изменения интенсивности изнашивания испытываемых образцов (дисков и роликов) за все время испытания показал, что с ростом нагрузки интенсивность изнашивания возрастает у всех пар трения (рис.3). Меньшую интенсивность изнашивания имеют пары трения с однослойным и двухслойным покрытием с УДА-наполнителями, показавшие и более высокие значения критических нагрузок, влекущих заедание.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтвердили реальность формирования композиционных покрытий деформационным плакированием гибким инструментом, т.е. вращающейся проволочной щеткой.

Однослойные композиционные покрытия, содержащие в своем составе ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза, при одном и том же объемном содержании, в зависимости от режимов трения, могут проявлять как антифрикционные, так и фрикционные свойства.

Повышения износостойкости и устойчивости к заеданию композиционных покрытий в 2,5...3 раза, по сравнению с образцами без покрытий, можно достичь дополнительным плакированием композиционного покрытия медь-УДА многокомпонентным композитом (сплав меди, олова, свинца и цинка) с графитом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий/ П.А.Витязь, В.С.Ивашко, А.Ф.Ильюченко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.;
2. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.;
3. Алексеев Н. М. Металлические покрытия опор скольжения. – М.: Наука, 1978. – 76 с.;
4. Белевский Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. лица РАН, 1996. – 230 с.
5. Анцупов В.С. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. - Магнитогорск: МГТУ, 1999. - 242 с.;
6. Патент РБ № 1143 «Устройство для нанесения металлических покрытий на поверхность металлических изделий»/ Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Адашкевич В.И. и др. Заявл. 03.05.2003. Оpubл. 30.12.2003;
7. Исследование изнашивания поверхностей трения с покрытиями, сформированными гибким инструментом/ Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Зольников В.Г. - В кн.: Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междун. сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2003. Вып. 25. – С. 212 – 220.
8. Тимошков Ю.В., Губаревич Т.М., Ореховская Т.И. и др. Свойства композиционных никелевых покрытий с различными типами ультрадисперсных алмазных частиц// Гальванотехника и обработка поверхности, 1999, т.7, № 2, с. 20-25;
9. Долматов В. Ю., Буркат Г. К. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза как основа нового класса композиционных металл-алмазных гальванических покрытий.// Сверхтвердые материалы , 2000, №1, с. 84-95.