

¹Е. К. Соловых, канд. техн. наук,
²Б. А. Ляшенко, д-р техн. наук, проф.,
²В. И. Калинин, канд. техн. наук

ИЗНОСОСТОЙКИЕ НЕСПЛОШНЫЕ ПОКРЫТИЯ КАРКАСНОГО ТИПА

¹Кировоградский национальный технический университет

²Национальный авиационный университет

Предложен новый тип упрочнения поверхности дискретными покрытиями каркасного типа. Они представляют собой перемычки из сверхтвердого материала в виде сетки с чередующимися открытыми полостями для удержания продуктов износа, частиц абразивной среды и смазки. Приведены технология, расчет и оптимизация конструкции покрытия по минимальному напряженно-деформированному состоянию, а также проведены экспериментальные исследования. Показано преимущество каркасных покрытий в сравнении с дискретными покрытиями островкового типа в условиях высоких нагрузок, температур и скоростей.

Состояние проблемы. Не сплошные износостойкие покрытия островковой поверхностной структуры хорошо зарекомендовали себя в машиностроении и металлообработке при оптимальных нагрузках [1; 2]. Однако с ужесточением эксплуатационных режимов они требуют дальнейшего усовершенствования. С целью дальнейшего стабильного повышения работоспособности конструкционных материалов и инструментов с покрытиями, работающих в экстремальных режимах, появляется необходимость создания таких новых конструктивных схем покрытий, которые смогли бы противостоять высоким температурам, давлениям, скоростям, агрессивным средам и одновременному воздействию всех факторов на рабочие поверхности. Кроме того, покрытия должны противостоять негативному воздействию твердых частиц износа и абразивных частиц рабочей среды.

При изнашивании генерируется значительное количество твердых продуктов износа, поэтому необходимо учитывать их абразивное воздействие на трибосопряжение [3]. Количественный анализ твердых частиц износа производят с применением методов

оптической и электронной микроскопии, а также анализом проб масла. Установлены зависимости состава частиц фрикционного изнашивания от рабочих нагрузок [4]. Установлена корреляция между скоростью износа и структурными характеристиками продуктов износа [5].

Для оценки влияния твердых частиц износа применяют имитационное моделирование и компьютерные программы. Имитационное моделирование формулирует новый закон изнашивания, который учитывает отрыв частиц и поведение их в зоне контакта [6]. Эта модель предлагает аналитический закон изнашивания, учитывающий судьбу отделившихся частиц. Предложена система уравнений для абразивных частиц и компьютерная программа для прогнозирования износостойкости подшипника, когда абразивная частица контактирует со скользящей поверхностью и частично внедряется во втулку подшипника [7]. В программе учитывается размер частиц, механические характеристики частиц и основы, скорость скольжения. Разработана модель, описывающая элементарный акт отделения частицы с поверхности. При этом контактно-усталостный механизм изнашивания рассматривается как наиболее часто встречающийся механизм разрушения поверхности [8]. В модели, полученной с применением МКЭ, отражается взаимодействие твердых частиц с поверхностью трения, находящихся в условиях фрикционного контакта при больших контактных нагрузках [9], а также особенности поведения частиц в условиях как трения скольжения так и трения качения. При этом учитываются механические свойства частиц и поверхности, размеры частиц и скорость движения фрикционного контакта.

Достаточно внимания уделяют влиянию частиц абразива из окружающей среды на износостойкость трибосопряжений. Показано, что при большом уровне загрязненности смазочной жидкости положение вала в подшипнике перестает быть устойчивым, расход энергии увеличивается и увеличивается износ сопряженных поверхностей [10]. Экспериментально исследовали влияние на износостойкость отношения характеристического размера абразивных частиц к величине зазора [11]. Приведен теоретический анализ износостойкости при контактном взаимодействии абразивных частиц в условиях трения скольжения. Показано, что в общем случае из-

нос зависит от геометрических свойств абразивных зерен и соотношения механических свойств абразива и основы [12].

Отмечают два противоборствующих механизма – вынос продуктов износа из зоны трения и их налипание на трущиеся поверхности [13]. Особенно эта проблема касается гидрооборудования горнорудной промышленности [14]. Предполагается, что эта проблема должна решаться не только фильтрованием жидкости. Необходимо также исследовать влияние природы, размера и других характеристик абразивных частиц на износ, на основе которых разработать критерий повышения надежности гидросистемы возможно даже в ущерб эффективности ее работы.

Проблему удаления абразивных частиц с контактирующих поверхностей решают различными методами. В простейших случаях их удаляют щеткой [15]. Широкое распространение получает метод применения канавок на фрикционных поверхностях [16; 17].

Характеристики регулярного микрорельефа рассматриваются только из условий растекания смазки и не рассматривают задачи нейтрализации твердых частиц износа и абразивных частиц из рабочей среды [18]. Маслоудерживающая способность поверхности трения износостойкого покрытия является наиболее значимым критерием его работоспособности [19]. Созданию маслостойкой поверхности путем образования микролунок и микрокарманов посвящено достаточно исследований [20; 21]. Регулярную поверхность микроструктуру выполняют накаткой методами ППД [18], струйно-абразивной обработкой [22; 23], лазерной обработкой (лазерным хонингованием) [24; 25], методами фотолитографии [26]. Фирма Toyota патентует технологию образования микрокарманов путем электролитического травления композиционного материала [27; 28]. Подобную поверхность называют также текстурированной шероховатостью [29]. Указывают, что трибосвойства поверхностей с микрорегулярной структурой зависят от геометрии углублений (размера, формы) и плотности их распределения по поверхности [30].

Антифрикционную поверхность с дискретно-ориентированной топографией образуют путем нанесения лунок-углублений [31]. Глубина лунок составляет 12...38 мкм при плотности 20...45%. Наносят лунки виброударным ППД по заданному закону. Этим снизили коэффициент трения в трибосопрежении в 1,3–1,5 раза,

повысили износостойкость в 1,5–3 раза и задиростойкость в 1,5–1,8 раза. Лунки диаметром 25...57 мкм, нанесенные шаровым индентором, показали повышение износостойкости в среде абразива более, чем в 2 раза в сравнении с азотированной сталью 30ХГСА и в 1,8 раза в сравнении с ЭИЛ-покрытием твердого сплава ВК8 [32]. Разработана технология одновременного нанесения высокотвердых дискретных покрытий и образования лунок [33]. Это достигается методом ЭИЛ путем смены полярности электрического тока после каждого импульса, т.е. одновременно проводят операцию легирования (наносит дискретный участок покрытия) и электроэрозионную обработку (образование лунок).

Износостойкие поверхности производят интегрированными технологиями – сочетаниями предварительной механической обработки с нанесением канавок или лунок и последующей традиционной химико-термической обработкой [34].

Цель работы. Предложен новый принцип упрочнения износостойкой поверхности. Принцип заключается в создании регулярного рельефа на исходной поверхности путем нанесения несплошного покрытия в виде каркаса (или сетки). При этом регулярные углубления образуются за счет зон несплошности каркасного покрытия. Глубина зон несплошности равна толщине каркасного покрытия. Размеры зон несплошности в плане выбираются из условий оптимального распределения напряженно-деформированного состояния в условиях эксплуатации. Если рассматривать дискретные покрытия островкового типа как позитивное изображение, то каркасные покрытия являются негативным отображением дискретных покрытий островкового типа.

На покрытия каркасного типа возлагаются такие функции:

- наличием регулярных полостей-впадин улавливать твердые частицы износа, а также абразивные частицы из окружающей среды;
- удерживать и накапливать продукты вторичных структур при их периодическом разрушении;
- удерживать смазку в полостях каркасного покрытия;
- не допускать растрескивания и отслоения покрытия в условиях эксплуатации путем минимизации напряженно-деформированного состояния за счет оптимального соотношения геометрических параметров регулярного рельефа.

Поэтому *цель работы* заключалась в сравнении износостойкости покрытий островкового и каркасного типов.

Методика исследований. В качестве материала основы принята сталь 40Х. Дискретные покрытия островкового и каркасного типов наносили вакуум-плазменным методом на модернизированной установке ННВ-6,6-И1 [35]. Технологическое обеспечение дискретной структуры островковых покрытий осуществлялось сеточными экранами [36–38]. Создание покрытий каркасного типа обеспечивали активные экранирующие пасты [39; 40]. Материал покрытия – TiN. Исследовали три типа каркасных покрытий:

- перфорированные в виде сетки с отверстиями, выполненными по круговому контуру (рис. 1, *а*);
- ажурные в виде опорных узлов, соединенных узкими перемычками (рис. 1, *б*);
- ячеистые в виде каркаса с гексагональными ячейками (рис. 1, *в*).

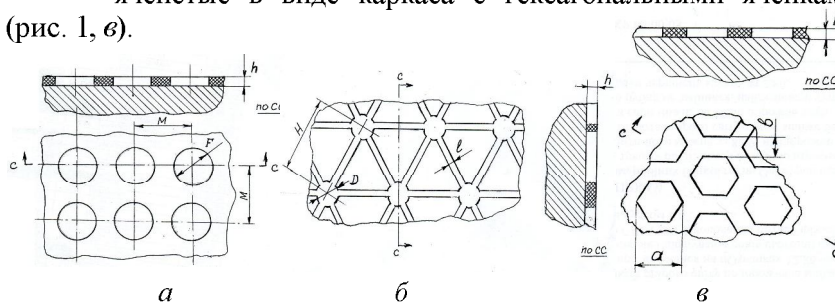


Рис. 1. Расчетные схемы каркасных покрытий: *а* – перфорированные, *б* – ажурные, *в* – ячеистые

Расчет напряженно-деформированного состояния каркасных типов покрытий. Основным методом расчета напряженно-деформированного состояния любого типа конструкций, в том числе дискретных покрытий, является численное моделирование. Из многих представленных программ [41], которые широко используются ведущими специалистами, использовали NASTRAN – один из простых и удобных инструментов. По чертежам каркасных покрытий (рис. 1) была построена часть основной модели, потом путем простых манипуляций в виде копирования элементов и их зеркального отображения образована основная модель (рис. 2).

Для сокращения времени на расчет используем плоскости симметрии модели и рассчитываем ее часть. Полученные результаты представляем в виде распределения напряжений по объему мо-

дели и графиков со значениями напряжений в элементах по длине или ее глубине. Все созданные модели имеют жесткую основу из стали 40Х и покрытия TiN толщиной 24 мкм.

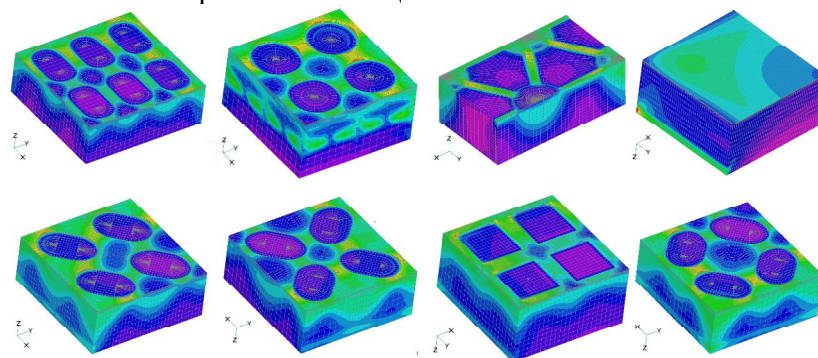


Рис. 2. Конечноэлементные модели с разной формой покрытия

Толщина сплошных покрытий не превышает 12 мкм. Это связано со значительными остаточными напряжениями, которые возникают в покрытии во время охлаждения в вакуумной камере и его растрескиванием при превышении этого предела. Однако дискретные покрытия не имеют этого недостатка, и поэтому их толщину можно значительно увеличить для повышения износостойкости пар трения.

Все созданные модели разбивали на гексагональные конечные элементы, что, как правило, повышает точность расчетов и добавляет удобства при построении графиков в представлении разрезов для любой модели. При расчете заданы модули упругости и коэффициенты Пуассона для материала основы и покрытия $E_o=2,0E+05$ МПа, $E_{\text{п}}=4,40E+05$ МПа, $\nu_o=0,25$, $\nu_{\text{п}}=0,25$, а также нагрузка (единичная) в виде равномерно распределенного давления по поверхности покрытия (рис. 3); соответственно необходимо закрепить модель (ограничить степени свободы), учитывая ее симметричность.

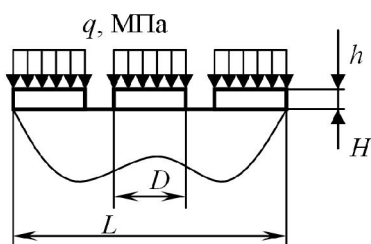


Рис. 3. Схема приложения распределенной нагрузки

Рассмотрим распределение напряжений по глубине композиции основа–покрытие. Для этого построены графики напряжений в трех характерных точках, выделенных белым цветом на рис. 4. Первая точка является центром в зоне без покрытия, вторая центром между четырьмя смежными зонами без покрытия и третья – центр между двумя смежными зонами.

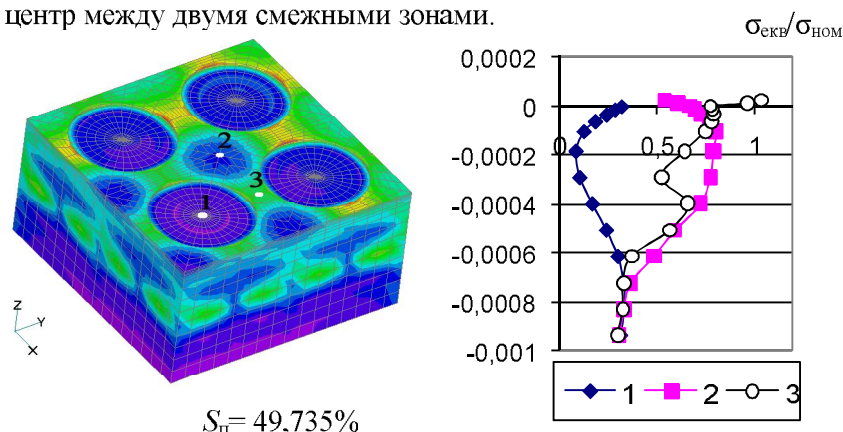


Рис. 4. Модель перфорированного покрытия с обозначенными белым цветом областями, для которых строился график напряжений по глубине композиции основа–покрытие

Из напряжений в точке 3 (рис.4) по глубине перфорированного покрытия видно, что между покрытием и основой есть существенный перепад напряжений, что негативно отобразится на адгезионной и когезионной прочности покрытия.

По мнению авторов оптимальными, с точки зрения когезионно-адгезионной прочности, являются ячеистые покрытия, поскольку как в покрытии, так и в основе под ним, напряжения распределяются равномерно, меньше на 25%, и не имеют характерных концентраций (рис. 5, б).

Рассмотрим напряжения в ячеистом покрытии по глубине модели с учетом его сплошности (рис. 6–8). Чем выше его сплошность, тем выше нагружены участки, свободные от покрытия на удалении от зоны адгезионного контакта (рис. 6). При сплошности до 50% напряженное состояние в области второй точки в покрытии почти на 30% меньше, чем в основе, и максимум сосредотачивается

в зоне адгезионного контакта, что снижает прочностные свойства покрытия (рис.7). Оптимальная, с точки зрения адгезионно-когезионной прочности, сплошность ячеистого покрытия, исходя из трех графиков (рис.6–8), колеблется в пределах 65–78 %.

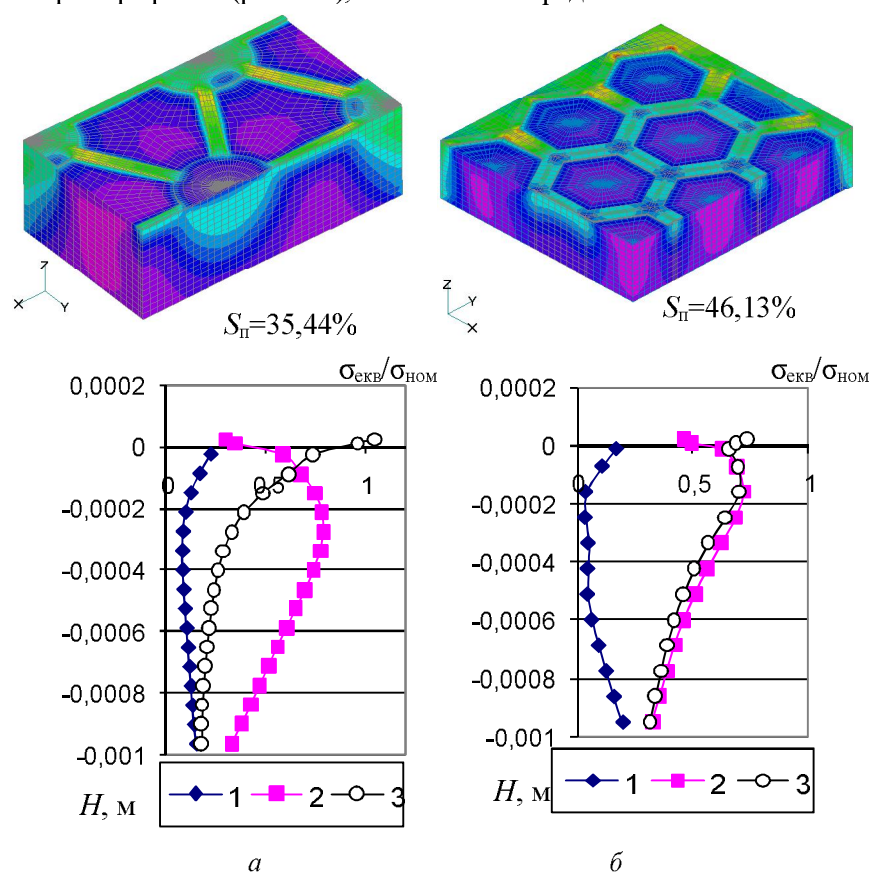


Рис. 5. Ажурное (а), ячеистое (б) покрытия и графики напряжений по глубине соответственно

Таким образом, моделируя различные типы покрытий на стадии проектирования, можно определить наиболее напряженные места в модели, оптимизировать ее геометрические параметры, тем самым получить максимальную эффективность от их применения.

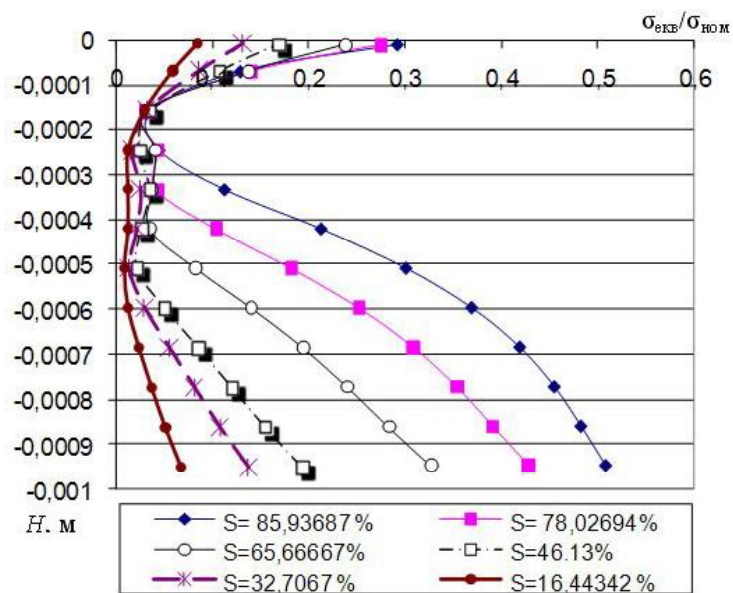


Рис. 6. Напряжение по глубине для первой точки в модели с ячеистым покрытием в зависимости от его плотности

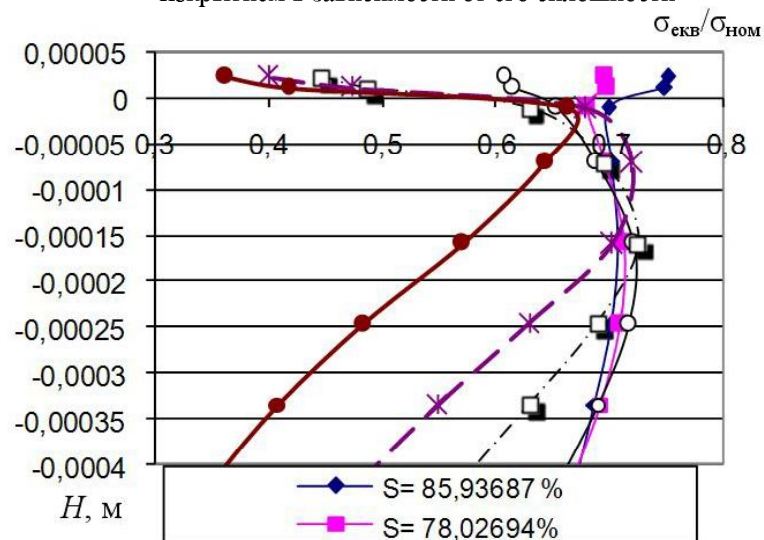


Рис. 7. Напряжение по глубине для второй точки в зависимости от плотности ячеистого покрытия

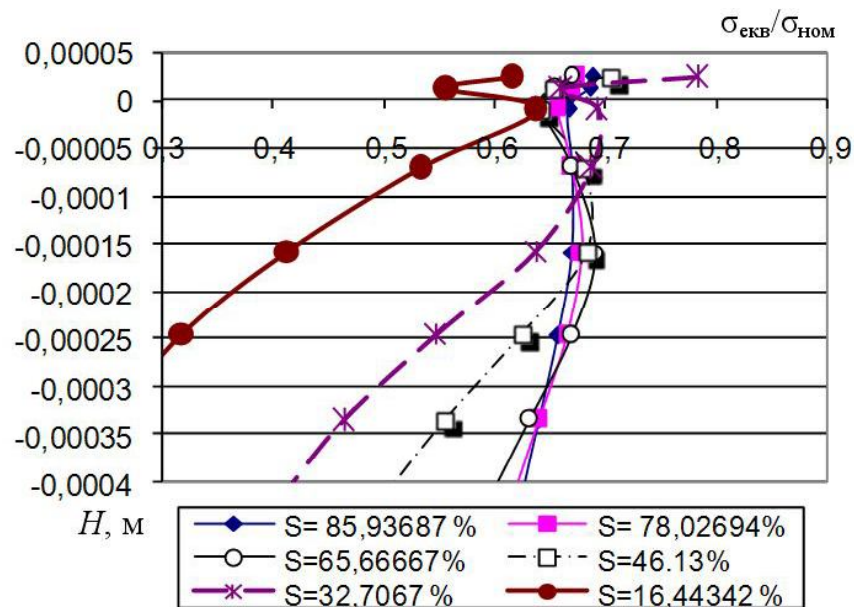


Рис. 8. Напряжение по глубине для третьей точки в зависимости от сплошности ячеистого покрытия

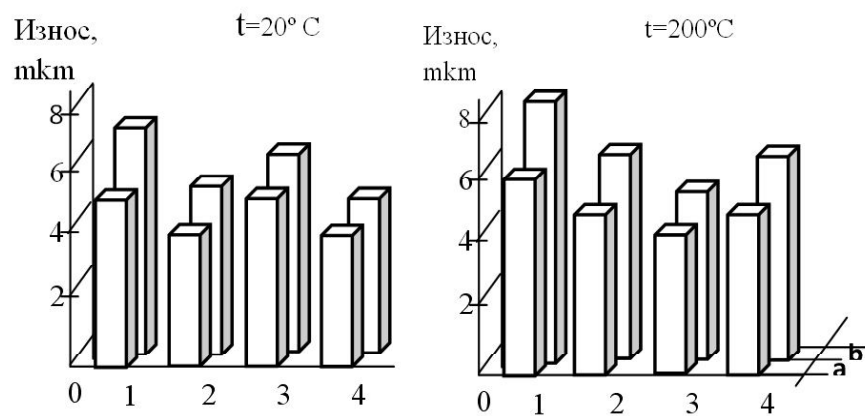


Рис. 9. Сравнительная износостойкость дискретных островковых и каркасных покрытий: 1 – островковые; 2 – ажурные; 3 – перфорированные; 4 – ячеистые; а – износостойкость при смазке МС-22; б – износостойкость без смазки

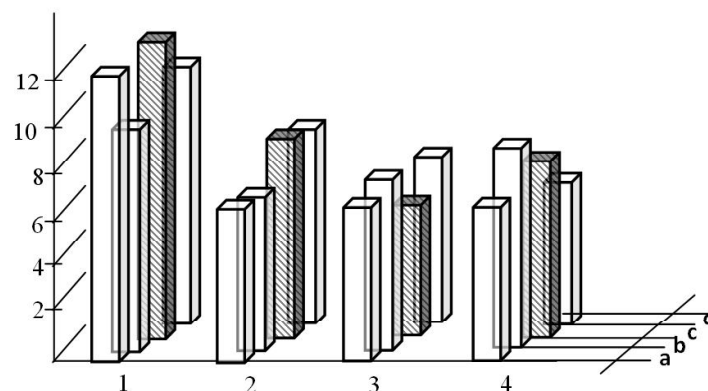


Рис. 10. Износостойкость при ужесточении режимов испытаний: 1 – островковые, 2 – ажурные, 3 – перфорированные, 4 – ячеистые; *a* – удвоенная контактная нагрузка, $P = 24$ МПа; *b* – удвоенная скорость скольжения, $V = 2,4$ м/с; *c* – температура испытаний 400°C ; *d* – испытания в абразивной эмульсии

Экспериментальные исследования каркасных покрытий.

Экспериментальное определение износостойкости каркасных покрытий выполняли на образцах из стали 40Х с вакуум-плазменным покрытием TiN толщиной 24 мкм. Испытания проводили в два этапа:

- на первом этапе определяли сравнительную износостойкость дискретных покрытий островкового и каркасного типов при режимах: $P = 12$ МПа, $V = 1,2$ м/с, температуре испытаний 20 и 200°C , без смазки и со смазкой МС-22;

- на втором этапе двукратно ужесточали режимы испытаний: удваивали нагрузки ($P = 24$ МПа) и скорость $V = 2,4$ м/с, температуру испытаний 400°C .

Проведены также испытания на износостойкость в эмульсии с кварцевым песком зернистостью 200 мкм. Испытания проводили на центробежном ускорителе в соответствии с ГОСТ 2301–78. В качестве абразива использовали кварцевый песок массой 3 кг на одно испытание. Дисперсность песка составляла 200 мкм, время воздействия абразива – $2 \pm 0,15$ ч; скорость вращения ротора центробежного ускорителя – 3000 об/мин. Скорость частиц абразива при этом $V_a = 80$ м/с. Применяли листовые образцы с защитными покрытиями размерами 15×25 мм. Взвешивание образцов до и по-

сле испытаний проводили на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до $\pm 0,0001$ г.

Результаты испытаний дискретных островковых и каркасных покрытий на износостойкость по первому этапу приведены на рис. 9, результаты испытаний на ужесточенных режимах второго этапа – на рис. 10.

Меньшее различие вариантов «а» и «б» для каркасных покрытий свидетельствует об эффективном удержании и накапливании вторичных структур при их периодическом разрушении.

Результаты экспериментальной проверки подтверждают эффективность новых дискретных покрытий каркасного типа.

Выводы

Методы экспериментальных исследований, а также расчета напряженно-деформированного состояния дают возможность определить оптимальные технологические режимы и конструктивную компоновку каркасных типов покрытий, с помощью которых достигается максимально возможная прочность и долговечность при минимальных затратах. Этим заложены основы общей методологической базы.

1. Предложена новая конструктивная схема дискретных покрытий каркасного типа. На всю толщину покрытия формируются регулярные полости. В зависимости от геометрической формы полости в плане различают ажурные, перфорированные и ячеистые покрытия.

2. Каркасные износостойкие покрытия многофункциональны: улавливают твердые частицы износа и абразивные частицы рабочей среды, удерживают и накапливают продукты вторичных структур при их периодическом разрушении, удерживают смазку в полостях каркаса.

3. В процессе эксплуатации не возникает растрескивание и отслоение каркасного покрытия путем минимизации напряженно-деформированного состояния за счет оптимального соотношения геометрических параметров регулярного рельефа.

4. При триботехнических испытаниях Ст.40Х с каркасными покрытиями их преимущество в сравнении с дискретными покрытиями островкового типа проявилось в повышении износостойкости на 15...29% при сухом трении и температуре 20 °С, и на

22...38%, а при 200 °С (без смазки). При трении со смазкой МС-22 каркасные покрытия показали повышение износостойкости до 22% при температуре 20 °С и до 33% при 200 °С. С ужесточением эксплуатационных параметров преимущества каркасных покрытий в сравнении с островковыми увеличиваются.

5. Каркасные покрытия наносят методом PVD с использованием экранирующих активных паст.

Список литературы

1. Покрытия и их использование в технике // В кн. «Прочность материалов и конструкций» / под ред. В.Т.Трощенко – 2-е изд. – К.: Академперіодика, 2006 – С.981–1074.
2. Ляшенко Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б.А.Ляшенко, А.Я.Мовшович, А.И.Долматов // Технологические системы – 2001 – № 4 (10). –С.17–25.
3. Sutor P. Tribology of silicon nitride and silicon nitride-steel sliding pairs / P. Sutor // Ceram. Eng. and Sci. Proc., 1984. – 5, № 7–8. –С.460–469.
4. Scardi P. Microstructure of Cu-Be alloy tribooxidative wear debris / P.Scardi, M.Leoni, G. Straffelini et al. // Acta mater., 2007 – 55, № 7. –P.2531–2538.
5. Belin M. Correlation between wear rate and structural data of debris / M.Belin, J.Mansot, J.Martin // Interface Dyn.: Proc. 14th Leeds-Lyon Symp. Tribol., 8–11 Sept. 1987 – Amsterdam, 1988. –P.305–310.
6. Fillot N. Simulation of wear through mass balance in a dry contact / N.Fillot, I.Iordanoff, Y.Berthier // Trans. ASME J. Tribol. 2005 – 127, № 1. – P.230–237.
7. Khonsar M.M. On the role of particulate contamination in scuffing failure / M.M.Khonsar, S.H. Wang // Wear – 1990 – 137, № 1. –P.51–62.
8. Горячева И.Г. Моделирование изнашивания поверхностей при контактном взаимодействии // Тр. 6 сессии Междунар. науч. школы, посвящ. памяти В.П. Булатова, «Фунд. и прикл. пробл. теории точности и качества процессов, машин, приборов и систем» (С.-Петербург, 30 сент. – 3 окт., 2003), –СПб.: Изд-во ИПМаш РАН, 2003. –Ч.1. –С.9–13.
9. Kang Y.S. A finite element model for spherical debris denting in heavily loaded contacts / Y.S.Kang, F.Sadeghi, M.R.Hoeprich // Trans. ASME J. Tribol., 2004 – 126, № 1. –P.71–80.
10. Duchowski J.K. Filtration requirements for journal bearings exposed to different contaminant levels / J.K.Duchowski, W.M.Wetzstein, M.Dmochowski // Tribol. and Lubr. Eng.: 14 Int. Colloq. Akad. Esslingen, 2004. –P.991–994.

11. *Williams Y.A.* Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts / Y.A.Williams, A.M. Hyncica // *Wear* – 1992. –152, № 1. –P.57–74.
12. *Hisakado T.* Contact mechanism between sliding surfaces. 6th report. Analyses of effects of transferred particles and abrasive grain size on abrasive wear / T.Hisakado // «Дзюнкацу, J. Jap. Soc. Lubr. Eng.», 1986 – 31, № 7. – P.469–476.
13. *Singer I.L.* Composition and sliding contact behavior of oxidized titanium implanted 52100 steel / I.L.Singer, R.A. Jeffries // *Mater. Sci. and Eng. A.* – 1989 – 115. –P.279–284.
14. *Frith R.H.* Control of solid contamination in hydraulic systems. An overview / R.H.Frith, W.Scott // *Wear* – 1993 – 165, № 1. –P.69–74.
15. *Kohno M.* Влияние процесса удаления продуктов изнашивания из зоны фрикционного контакта на трение и износ сопряжения / M.Kohno, K.Kuwahara // «Дзюнкацу, J. Jap. Soc. Lubr. Eng.», 1982. – 27, № 7. – P.512–518.
16. *Lee H.G.* Effect of wear debris on the tribological characteristics of carbon fiber epoxy composites / H.G.Lee, H.Y.Hwang, D.G. Lee // *Wear* – 2006 – 261, № 3–4. –P.453–459.
17. *Баринов С.В.* Исследование износостойкости деталей с неоднородной поверхностью трения / С.В.Баринов, Б.П.Загородских, А.А. Симдянкин // *Трение и износ*, 2003 – 24, № 5. –С.568–572.
18. *Радіоненко О.В.* Механізм граничного змащування поверхонь тертя з частково регулярним мікрорельєфом та їх технологічне забезпечення / О.В. Радіоненко // Автореф. канд. дис. Київ, НАУ – 2006. – 20 с.
19. *Шевцов А.И.* Анализ корреляции между маслоудерживающей способностью и износостойкостью напыленных защитных покрытий / А.И. Шевцов, А.С. Никитина, В.В. Хроленок // *Сварка и родств. технол.* 2000. – № 3. –С.106–108.
20. *Yang P.* Quantitative comparisons between measured and Solved EHL dimples in point contacts / P.Yang, M.Kaneta, S.Masuda // *Trans. ASME. J. Tribol.* – 2003 – 125, № 1. –P. 210–214.
21. *Coulon S.* Pressure profiles measured within lubricated contacts in presence of dented surfaces. Comparison with numerical models / S.Coulon, I.Jubault, A. Lubrecht et al. // *Tribol. Int.* – 2004 – 37, № 2. –P.111–117.
22. *Пат. 2283212 Россия*, В 23 С 1/00. Струйно-абразивный способ создания на поверхности трения смазочных микроматериалов. Опубл. 10.09.2006.
23. *Исупов М.Г.* Создание антифрикционной поверхности струйно-абразивной обработки / М.Г.Исупов // *Трение и износ* – 2005. – 26, № 4. – С.428–433.

24. "Laser-Honen" optimiert Motorenbetrieb // VDI – Nachr., 2004, № 37. –S.29.
25. Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser-surface texturing / I.Etsion // Tribol. Lett. – 2004 – 17, № 4. –P. 733–737.
26. Chae Young-hun. Характеристики трения и их зависимость от плотности углублений, нанесенных на поверхность методом фотолитографии / Chae Young-hun, Kim Seock-sam // Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A. – 2005, № 3. –P.411–417.
27. Заявка 62-260028 Япония, С 22 С 1/09. Пара скольжения. Оpubл. 12.11.87.
28. Заявка 62-260029 Япония, С 22 С 21/00. Пара скольжения. Оpubл. 12.11.87.
29. Tonder K. Hydrodynamic effects of tailored intel roughnesses: extended theori / K.Tonder // Tribol Int. – 2004 – 37, № 2. –P.137–142.
30. Xiong Fei. The study of tribological properties on surface texture / Xiong Fei, Zhou Xincang. // Трибофатика: Сб. докл. 5 междунар. симп. ISTF-2005, (Иркутск, 3–7 окт. 2005), – Иркутск: Изд-во ИрГУПС 2005. – Т.2. –С.197–201.
31. Возненко В.В. Поліпшення експлуатаційних характеристик деталей приводів шляхом формування функціональних поверхонь з дискретно-орієнтованою топографією: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, К., – 2006. – 20 с.
32. Ляшенко Б.А., Солових Є.К., Лопата Л.А., Марчук В.Є. Підвищення міцності та довговічності деталей машин агропромислового комплексу багатофункціональними покриттями // Доп. сесії Наукової ради з проблеми «Механіка де формівного твердого тіла» НАН України, 15–16 жовт. 2008, Полтава.
33. Пат. 5680 Україна, В 23 Н 1/02, В 23 Н 7/04. Спосіб електроіскрової обробки поверхонь тертя струмопровідних деталей. Оpubл. 15.03.2005, Бюл. № 3.
34. Пат. 44643, Україна, F 01 L 1/20, С 23 С 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталей. Оpubл. 12.10.2009, Бюл. № 19.
35. Пат. 4250, Україна, С23С 14/00, С23С 14/24, С23С 14/26. Установка для вакуум-плазмового напыления. Оpubл. 17.01.2005, Бюл. № 1.
36. Солових Е.К. Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры / Е.К.Солових, Б.А.Ляшенко, А.В. Рутковский и др. // Технологические системы – 2007, № 2. –С.22–27.

37. Пат. 26555 Україна, С23С 14/32, С23С 14/04. Спосіб нанесення зносостійких несущіх покриттів на неметалеві матеріали // Ляшенко Б.А., Солових Є.К., Антонюк В.С. та ін. Опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15.

38. Пат. 26322 Україна, С23С 14/00, С23С 14/24, С23С 14/26. Установка для вакуум-плазмового напилення // Солових Є.К., Ляшенко Б.А., Антонюк В.С. та ін. Опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14.

39. Пат. 40289 Україна, С23С 14/32. Спосіб нанесення несущіх зносостійких покриттів // Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Калініченко В.І., Солових Є.К. Опубл. 25.03.09, Бюл. № 6.

40. Солових Е.К. Технологическое обеспечение дискретной структуры поверхности при азотировании / Е.К.Солових, Б.А.Ляшенко, В.Г.Каплун и др. // Технологические системы – 2009, – № 2. – С.55–59.

41. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г.Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.: ил.

Солових Є.К., Ляшенко Б.А., Калініченко В.І. **Зносостійкі несущі покриття каркасного типу** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 54. – С.31–46.

Досліджено вплив попередньої лазерної обробки на інтенсивність азотування, структуру й характеристики зношування азотированих покриттів на титановому сплаві ВТ6. Показано, що попередня обробка уменьшает час азотування, при цьому збільшується товщина азотированного шару. Інтенсивність зношування визначають самообразующиеся в контакті трибологические структури диссипативного типу, які формуються з ультра-дисперсних продуктів взаємодії речовин твердих тіл і змащення. Зносостійкість покриттів, отриманих з попередньою обробкою, у півтора-два рази вище, ніж покриттів, отриманих традиційним методом.

Рис.: 10, список літ.: 41 найм.

Ключевые слова: трение, износ, покрытие, дискрет, каркас, PVD, НДС, численные методы

Wear resistant discontinuous coatings of frame type

The frame types of coatings by numerical and experimental methods are investigated. It's shown, that coatings of a cellular structure are the best from the point of strength. The optimum denseness of the given type of coatings is 65-78 %. The comparative wear resistance of a frame type of covers under various modes of loading with application of lubricating materials and abrasive, and also without them are presented. It's established, that the covers of a frame type on 15-38 of % are more abrasive resistant in a comparison with usual discrete covers under high loads, temperatures and velocities.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2010