

Марчук В.Е.¹,
Ляшенко Б.А.²,
Градыский Ю.А.³

¹Национальный авиационный университет,
г. Киев, Украина

²Институт проблем прочности
имени Г.С. Писаренко НАН Украины
г. Киев, Украина

³Харьковский национальный технический
университет сельского хозяйства
имени П. Василенко
г. Харьков, Украина

ДИСКРЕТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДАМИ ППД

УДК 620.178.16 (045)

Приведен обзор дискретного упрочнения рабочих поверхностей методами поверхности-пластического упрочнения. Показано перспективность их применения для повышения износостойкости деталей машин и механизмов.

Ключевые слова: дискретное упрочнение, поверхность-пластическое деформирование, микроуглубления, канавки.

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.

Несмотря на значительный прогресс науки о трении и изнашивании, вопросы повышения износостойкости в трибологических системах, особенно в экстремальных условиях эксплуатации, остаются во многом нерешенными. Это объясняется сложностью процессов и явлений, происходящих в тонких поверхностных слоях трибосопряжений, исследование которых за многолетнюю историю существования науки о трении и изнашивании вызывает значительный интерес трибологического сообщества. Необходимость комплексного обеспечения качества поверхностных слоев в трибологических системах определили в последнее время роль микрогеометрии поверхности трибоконтакта, что заложило основу нового научного направления – дискретное упрочнение поверхностей, как одну из перспективных направлений развития науки инженерии поверхности.

Сущность науки о дискретном упрочнении поверхностей заключается в разработке теории обоснованного конструирования форм дискретных участков поверхностного слоя рабочих поверхностей, их геометрических параметров и физико-химических свойств, которые обеспечивают повышенную адгезионную и когезионную стойкость в процессе деформации основы; формирование наиболее благоприятного напряженно-деформированного состояния в зонах фактического контакта при действии высоких контактных давлений контактирующих поверхностей; обеспечении работоспособности трибосопряжений с минимальным износом, в зависимости от условий эксплуатации.

Эффективность дискретной текстуры, которая возникает на рабочей поверхности при трении трибосопряжений, побудило трибологическое сообщество к созданию искусственных дискретных рельефов, которые создаются сегодня различными современными технологическими методами поверхностного упрочнения.

Обзор публикаций и результаты анализа. Результаты анализа методов дискретного упрочнения показали, что наиболее универсальными и эффективными являются способы создания на поверхностях трения различной формы искусственных регулярно расположенных дискретных микроуглублений или непрерывных микроканавок методами поверхностно-пластического деформирования, которые определяют главным образом контактные свойства поверхности: улучшение смазки, повышение сопротивления схватывания и коррозии, сокращение периода приработки.

Первые работы в этом направлении выполнены Фальцем К. в 20-е годы прошлого столетия, который предложил создавать каналы подвода масла к неподвижным элементам подшипников. Он рекомендовал наклон поверхности канавок на плоской детали выполнять 0,5% для больших скоростей при незначительном давлении и 0,2% – для малых скоростей и большом давлении [1]. Смазочные канавки в подшипниках необходимо располагать в ненагруженной зоне. Они облегчают засасывание масла в нагруженную зону и улучшают распределение смазки по длине подшипника.

В 80-х годах прошлого века, благодаря разработкам школы профессора Шнейдера Ю.Г. и его учеников [2-4], было разработаны научные основы создания и внедрения новых, основанных на поверхностном пластическом деформировании (ППД), способов образования на поверхностях трибоконтакта регулярных микрорельефов вместо шероховатости – методом вибрационного накатывания. Регулярность микрорельефа достигается тонким пластическим деформированием поверхностных слоев обрабатываемого материала шарами или алмазными наконечниками с усложнением кинематики за счет осцилляционного движения деформирующего элемента. В результате создаются одинаковые по форме, размеру и взаимному расположению микронеровности (рис. 1), что позволяет устанавливать оптимальный вид регулярного микрорельефа и значения его параметров, обеспечивая требуемые триботехнические характеристики [5]. Классификация таких способов дана в работе [2].

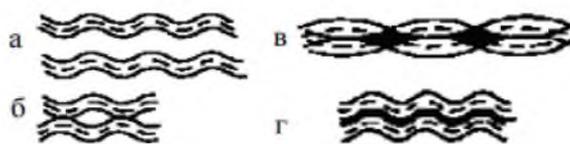


Рис. 1 – Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании:
а - каналы не касаются друг друга; в - каналы касаются друг друга;
б - каналы пересекаются; г - каналы накладываются

После вибронакатывания плоских поверхностей контактная жесткость и износостойкость деталей повышается в 1,5 – 3 раза, уменьшается момент трогания одной из деталей в контактной паре 1,5 – 1,7 раза, что способствует повышению плавности работы соединения. При сухом трении канавки работают как ловушки, задерживают в себе продукты износа, пыль и абразивные компоненты, благодаря чему локализуется их разрушительное действие. Микрорельеф с пересекающимися и обычными канавками обеспечивает хорошую износостойкость и герметичность в паре трения металлических деталей с различными резиновыми, а также пластмассовыми уплотнителями и сальниками. При обработке штоков гидроцилиндров землеройных машин, работающих в тяжелых условиях абразивного и коррозионного износа, вибронакатыванием стабильно обеспечивается получение шероховатости поверхности в пределах 1,6 – 0,2 мкм при одновременном увеличении микротвердости поверхностного слоя на 40 – 65%, гидравлическая плотность соединения с резиновыми уплотнителями растет на 45 – 70%, сила трения в соединении снижается на 40 – 55%, а усталостная прочность увеличивается на 30–40%, значительно возрастает коррозионная стойкость. Продолжительность периода нормального износа штоков после вибронакатывания на 40 – 50% выше, чем продолжительность этого периода, для шлифованных штоков [6].

С развитием и внедрением в производство высокоточного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) была создана программа АСОРМР, которая позволила выполнять технологические операции вибронакатывания на станках с ЧПУ. Программа АСОРМР позволяет автоматически рассчитывать параметры регулярного микрорельефа целью обеспечения необходимых эксплуатационных свойств деталей и соединений [7].

В результате обобщения исследований и опыта использования разработок в промышленности был создан стандарт ГОСТ 24773-81 [8], согласно которому регулярный микроре-

льєф может быть, как частично, так и полностью регулярным. В первом случае на поверхности образуются непрерывные или дискретно расположенные углубления, между которыми остается первичный, чаще всего нерегулярный микрорельеф обрабатываемой поверхности. Во втором случае образуется полностью новый микрорельеф с одинаковыми по форме, высоте и взаимным расположением элементов дискретного рельефа.

Для расширения технологических возможностей способа вибронакатывания для обработки заготовок малой жесткости из труднообрабатываемых материалов и сплавов, применяется способ со статико-импульсным нагружением деформирующих элементов. Импульсная нагрузка в сочетании с вращательным и возвратно-поступательным движениями в радиальном направлении создают перекрестное движение деформирующих элементов и периодически изменяют рабочее усилие и силу трения. Благодаря этому облегчается деформация микронеровностей обрабатываемой поверхности, а переменные силы активно перераспределяются в плоскости вибронакатывания. Это позволило в несколько раз уменьшить силу трения, повысить производительность в 1,5–2 раза, исключить операцию полустойковой обработки благодаря улучшению шероховатости поверхности до 1–2 класса. На обработанной поверхности формируется износостойкий, регулярный микрорельеф с перекрестным направлением рисок и неровностями малой и однородной высоты. На рис. 2 показаны следы траекторий осциллирующих движений деформирующих элементов на обрабатываемой поверхности: слева - следы от 4-х деформирующих элементов шариков, справа - от одного. При такой обработке стойкость инструмента возрастает в два и более раза, по сравнению со стойкостью при традиционном накатывании, облегчается деформация микронеровностей, уменьшается расход энергии на деформирование и трение [9].

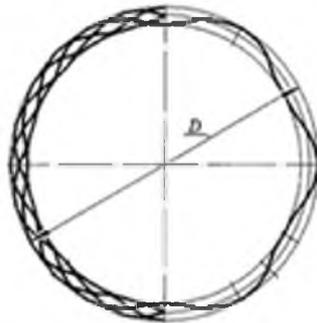


Рис. 2 – Поперечный разрез заготовки после обработки поверхности вибронакатыванием со статико-импульсным нагружением

Для регулирования микрорельефа деталей неподвижных соединений использовался один из способов ППД – накатывание [10]. В конструкции накатной головки применялись накатные ролики с деформирующими элементами конусной или пирамидальной формы. Данный метод позволяет получать частично-регулируемый микрорельеф с дискретными регулярными неровностями шахматного расположения (рис. 3).

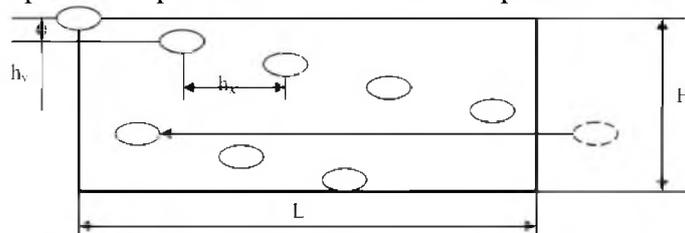


Рис. 3 – Развертка отверстий неподвижных соединений

Использование комбинированного способа *иглофрезерования с упрочнением* [11] позволяет повысить эффективность использования инструмента в целом, а также части его - иглофрезы с надежным креплением проволоочного ворса за счет повышения набивки ворса и жесткости иглофрезы (рис. 4). Надежность крепления ворса позволяет высокопроизводительно и качественно работать в тяжелых условиях инструмента и удалять значительные припуски. Получаемые на поверхности упрочняемой детали структуры белых слоев обладают повышенной твердостью, износостойкостью и сопротивлением усталостному разрушению.

Созданные при обработке дискретные канавки на поверхности трения выполняют функцию смазочных карманов (резервуаров), способствующих удержанию и распределению масла в зоне трения и, таким образом, повышению износостойкости трибосопряжения в целом. В работе [12] применяется система канавок с частично регулярным микрорельефом, которые формировались вибронакатыванием с последующим выглаживанием. В результате был получен несимметричный профиль канавки: одна сторона крутая, другая пологая. Наличие пологого выхода из канавки обеспечивает растекание масла по системе канавок и уменьшает износ трибосопряжения. Большая работа по вибронакатыванию была проведена в Восточной Европе [13].

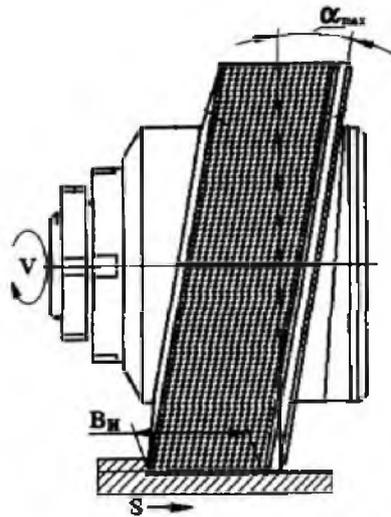


Рис. 4 – Схема обработки комбинированным иглоупрочняющим инструментом:
 α_{max} – максимальный угол наклона режущего и упрочняющего слоя

Вопросы, связанные с созданием регулярных рельефов, подробно изучены и в работах других авторов [14 – 17]. Маслоудерживающие дискретные канавки, как правило, меняют геометрию поверхности материалов и, соответственно, несущую площадь контакта при взаимодействии с другими поверхностями. Форма и размеры канавок определяются технологией их получения. Оптимальными считаются случаи, когда площадь смазочных канавок составляет 40–50% от общей площади поверхности.

Разработаны комбинированные технологии формирования смазочных микрокарманов вибронакатыванием [18, 19], струйно-абразивной обработкой [20] с последующим заполнением впадин микрорельефа антифрикционным материалом. Это значительно позволило увеличить срок службы деталей, снизить коэффициент трения в зоне трибоконтакта.

Такой же подход использовался в баббитовых подшипниках скольжения, изготовленных из латуни, бронзы, чугуна и другого материала с углублениями в виде сетки, заполненные баббитом [21, 22], которые способны поглощать посторонние частицы. Однако большие удельные нагрузки на подшипники приводят к усталостному разрушению

баббитовой заливки – возникновению трещин и последующему отделению частиц баббита (выкрашиванию).

В работах [23, 24] для повышения износостойкости гильз цилиндров предлагается создавать поверхность трения с неоднородными физико-механическими свойствами. Неоднородность физико-механических свойств поверхности трения колодки (схема испытания "ролик-колодка») достигалась выполнением в ней канавки треугольного сечения с глубиной 2,5 мм, с последующим заполнением медью или латунью. Способ заполнения канавок - дуговая пайка в среде аргона (рис. 5).

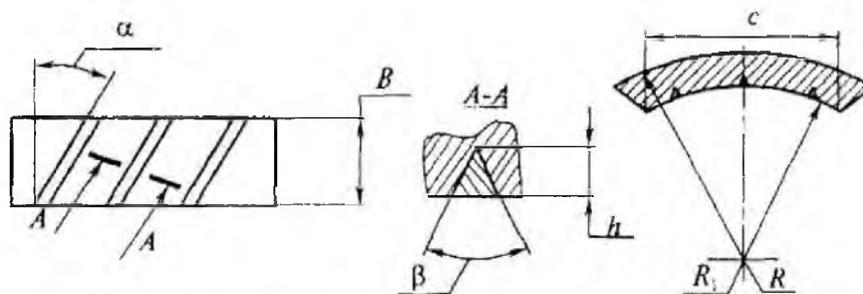


Рис. 5 – Схема расположения канавок на поверхности трения колодки

Для обеспечения высокой жесткости контакта на рабочих поверхностях микропинцетов формировались метил силиконовые полимерные покрытия, которые представляли собой дискретную структуру. В рамках гранта Assemic project MRTN-СТ-2003-504826 аналогичная задача решалась путем формирования рабочих поверхностей микропинцетов с более тонким рельефом в виде ансамбля сферических сегментов с собственной наношероховатостью (шероховатых сфер) [25].

В работе [26] представили идею модульной поверхности для удаления продуктов износа (оксидов) с поверхности электрических контактов, что ведет к сокращению повреждений и недопустимых деформаций поверхности трения. Изначально для формирования волнистой поверхности использовали технологию травления, позже она была заменена абразивной механической обработкой [27-29].

Для достижения высокой эффективности работы твердосплавного инструмента, обеспечении заданной формы режущего лезвия, его макро- и микрогеометрии в современном производстве используют метод магнитно-абразивной обработки (МАО). Исследования [30-34] показали перспективность метода обработки в скоординированном движении абразива, который формируется в процессе обработки инструмента силами магнитного поля.

Показаны возможности метода по эффективной обработке сверл при обеспечении шероховатости на передней кромке инструмента на уровне $R_a=0,25$ мкм, на задней $R_a=0,05-0,08$ мкм и на калибровочной части (лента сверла) $R_a=0,06-0,07$ мкм, а также формирования заданного радиуса округления режущих кромок. Экспериментальные исследования проводили на сверлах Ø16 мм, длиной рабочей части 50 мм, изготовленные из карбидного твердого сплава с PVD-покрытием типа (Ti, Al) N после их переточки. При этом отмечается увеличение поверхностной твердости изделий до уровня 20 ГПа и более [35].

Для восстановления прецизионных узлов трения приборов [36, 37] разработан и предложен виброударный метод поверхностно-пластического деформирования для создания дискретно-ориентированной топографии на рабочих поверхностях деталей в виде эллипсоидных лунок глубиной от 10 до 40 мкм и плотностью от 15 до 45%. Экспериментальные исследования показали, что данный метод позволяет за счет дискретного упрочнения и уменьшения фактической площади контакта уменьшить интенсивность изнашивания образцов из сплава АК6 до 7 раз, стали 18Х2Н4МА - в 2 раза.

Разработан концептуальный подход по созданию износостойких текстурированных луночных поверхностей (ТЛП) с углубленными дискретными участками за счет поверхностно-пластического деформирования (рис. 6) [38, 39]. Установлена закономерность износа текстурированных луночных поверхностей в условиях фреттинга при ограниченной подаче смазочного материала в зону трибоконтакта, которая учитывает конструктивно-технологические параметры дискретного участка и возможность удаления из зоны трибоконтакта продуктов изнашивания, предотвращая их действия как абразивного материала. Это дает возможность управлять процессами приработки при выборе оптимальной текстуры текстурированной луночной поверхности, в период приработки уменьшить коэффициент трения на 57–62 %, уменьшить период приработки на 10–20 % и увеличить износостойкость в период после приработки в 1,8–2,44 раза [40].

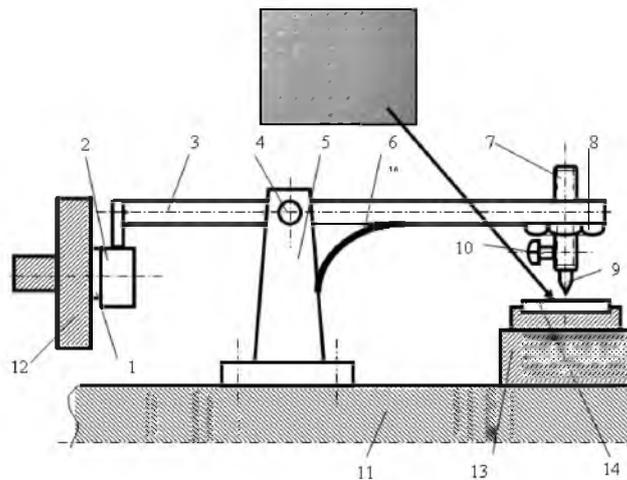


Рис. 6 – Устройство для создания лунок:

- 1 - приводной вал; 2 - кулачок; 3 - коромысло; 4 - ось коромысла; 5 - стойк оси коромысла; 6 - пружина;
7 - регулировочный винт; 8 - контргайка регулировочного винта; 9 - боек; 10 - механизм крепления бойка;
11 - основа; 12 - патрон; 13 - механизм перемещения; 14 - деталь (образец)

Применительно к пористым металлическим изделиям поверхностную обработку давлением с целью модификации поверхности можно реализовать через калибрование, основанное на деформации поверхностного слоя изделия продавливанием или обжатием в калибровочных пресс-формах. В настоящее время калибрование рассматривается в основном только как отделочная операция, совмещающая в себе доводку. В работе [41] изучается возможность образования твердофазного соединения из дискретных составляющих пористых металлических сред наряду с их уплотнением и упрочнением в результате деформационно-силового воздействия при калибровании пористого изделия. Таким образом, обработка давлением воздействует на структуру и свойства некомпактных сред и выступает в роли консолидирующей операции для материала поверхности пористого изделия.

Также был разработан способ, основанный на комбинированной дискретной ППД с использованием электрического тока. Для исследования кинетики процесса формирования зон повышенной твердости при контакте инструмента с образцами из сталей 40Х использовалось устройство, устанавливаемое на токарном станке.

Среди прочих методов ППД сегодня используются ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД), позволяющее управлять в широком диапазоне параметрами напряженно-деформированного состояния, структурой и микрогеометрией поверхности благодаря механо-физическим особенностям обработки. Впервые метод ППД с использованием ультразвукового инструмента был предложен в 1964 году И.И. Мухановым. От обычного выглаживания метод ППД ультразвуковым инструментом отличается тем, что инструмент совершает колебания с ультразвуковой частотой.

Амплитуда колибаний поляризована в плоскості, перпендикулярній оброблюваної поверхні деталі. В процесі обробки інструмент прижмається к оброблюваної поверхні с постійною силою. Как и при обычном выглаживании, перемещение инструмента по поверхности осуществляется путем вращения детали со скоростью и перемещения его вдоль образующей.

При обработке УЗПД поверхностей деталей на поверхности возникает волнистость с шагом, отличным от подачи. Гребень волны формируется за счет сдвига наплыва, образованного вокруг предыдущего отпечатка при взаимном перемещении инструмента и детали и последующего слияния с вновь образующимся наплывом при последующем ударе (рис. 7) в условиях дробного деформационного воздействия.

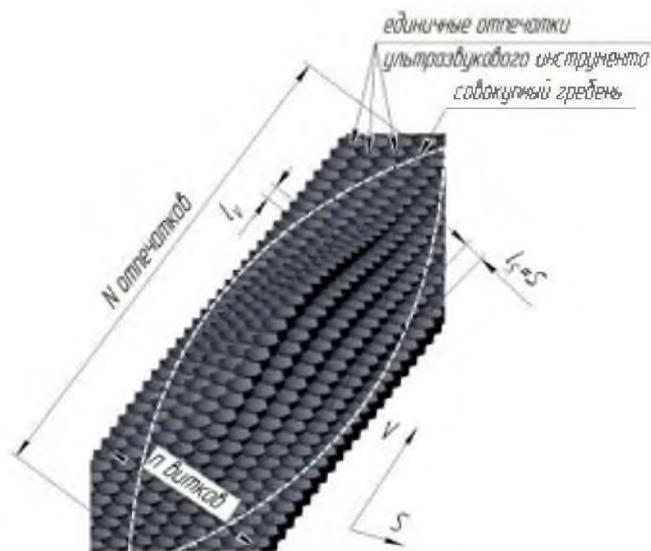


Рис. 7 – Схематическое изображение совокупного гребня волны при ударах инструмента

Выводы. Таким образом, проведенный анализ дискретного упрочнения рабочих поверхностей методами поверхностного пластического деформирования позволяет сделать вывод об их перспективности. Несмотря на большое количество публикаций, механизм явления, который происходит с регулярным микрорельефом, сегодня изучен недостаточно. Отсутствуют данные, позволяющие конструировать такую поверхность с максимальным выигрышем по эксплуатационным свойствам.

И, наконец, в сфере дискретных поверхностей существует потребность в четких стандартах, передачи технологий из лабораторий в промышленность. Необходимо также совершенствование существующих и разработка новых методик точного прогнозирования долгосрочного поведения поверхностей при эксплуатации по результатам краткосрочных лабораторных испытаний.

Литература:

1. Фальц К. Рациональные смазочные канавки в подшипниках / К. Фальц. – М. – Л.: Госиздат, 1929. – 61 с.
2. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулируемым микрорельефом / Шнейдер Ю.Г. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
3. Schneider Y.G. Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instrument Parts [Text]/Y.G. Schneider//Precis. Eng. – 1984. – 6. – P. 219–225.
4. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярного микрорельефа на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
5. Шнейдер Ю.Г. Регуляризация микрорельефов поверхностей деталей / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: ЛДНТП, 1986. – 24 с.

6. Режим доступу: http://metalat.ru/processing_metal/114-obrabotka-metalla-nakatyvaniem.html.
7. Голубчиков М.А. Моделирование процесса вибронакатывания / М.А. Голубчиков, Ю.П. Кузьмин // изд. вузов. Приборостроение. – 2010. –Т. 53, № 8. – С. 26-29.
8. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. 01.07.1982.
9. Пат. 2440232 Россия, В24В 39/06. Способ вибронакатывания плоскостей / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афанасьев Б.И., Сотников В.И., Самойлов Н.Н.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 2010116232/02; заявл. 23.04.2010. Опубл. 20.01.2012 Бюл. № 2.
10. Буканова И.С. Моделирование процесса накатывания частично-регулируемого процесса для определения фактической площади / И.С. Буканова, И.И. Ятло // Ползуновский вестник. – 2012. – 1/1. – С. 46–50.
11. Пат. 2243877 Россия, В24В 39/04, В24В 39/06. Комбинированный способ иглофрезерования с упрочнением / Степанов Ю.С., Харламов Г.А., Киричек А.В., Тарапанов А.С., Афанасьев Б.И.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 2003115186/02; заявл. 22.05.2003.
12. Радионенко О.В. Механізм граничного змащування поверхонь тертя з частково регулярним микрорельефом та їх технологічне забезпечення [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах / О.В. Радионенко. – Київ, 2006. – 20 с.
13. Bulatov V.P. Basics of Machining Methods to Yield Wear and Fretting Resistive Surfaces, Having Regular Roughness Patterns [Text] / V.P. Bulatov, V.A. Krasny, Y.G. Schneider // Wear. – 1997. – 208. – P. 132–137.
14. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
15. Клименко Л.П. Повышение долговечности цилиндров ДВС на основе принципов переменной износостойкости / под ред. В.В. Запорожца. — Николаев: НФ НаУКМА, 2001. — 294 с.
16. Чеповецкий И.Х. Антифрикционно-деформационный метод формирования рабочих поверхностей гильз цилиндров ДВС / И.Х. Чеповецкий, С.А. Ющенко // Двигателестроение. – 1990. – № 8. – С. 38-40.
17. Павліський В.М. Підвищення зносостійкості автотракторних двигунів в пусковий період [Текст]/В.М. Павліський. - Тернопіль: Видавництво "Збруч", 1999. - 200 с.
18. Черновол М.И. Комбинированный метод обработки поверхностей трения / М.И. Черновол, И.В. Шепеленко, А. Варума // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2011. – Вип. 24, ч. II. – С. 13–16.
19. Патент України на корисну модель №52699, С23Б 5/00. Спосіб нанесення антифрикційних покриттів / Кропівний В.М., Шепеленко І.В., Чернявський О.В. [та ін.] – Опубл. 10.09.2010, Бюл. №17.
20. Исупов М.Г. Создание антифрикционной поверхности струйно-абразивной обработкой / М.Г. Исупов // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – №4. – С. 428–433.
21. Хрущев М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф / М.М. Хрущев. – М.: Машиностроение, 1946. – 160 с.
22. Eastham D.R. Soft materials for overlays [Text] / D.R. Eastham, C.S. Crooks // Tribol. ind. Half Day Courses Leeds (17th Sept. 1980). – 1980. – P. 1–27.
23. Симдянкин А.А. Исследование износостойкости деталей слоеной конструкции/А.А. Симдянкин, Ю.В. Кривоपालов//Трение и износ. - 2000 (21). - №4. - С. 433–437.

24. 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.
25. Балабанова Н.В. Анализ топографии и физико-механических свойств покрытий для рабочих элементов микропинцетов / Н.В. Балабанова, С.А. Чижик, З. Римуза // Трение и износ. – 2006 (27). – №5. – С. 514–519.
26. Saka A. The Role of Tribology in Electrical Contact Phenomena / A. Saka, M.J. Lio, N.P. Suh // Wear. – 1984. 100. – P. 77–105.
27. Saka N. Boundary Lubrication of Undulated Metal Surfaces at Elevated Temperatures / N. Saka, H. Tian, N.P. Suh // Tribol. Trans. – 1989. 32 (3). – P. 389–385.
28. Suh N.P. Control of Friction / N.P. Suh, M. Mosleh, P.S. Howard // Wear. – 1994. 175. – P. 151–158.
29. Mosleh M. Friction of Undulated Surfaces Coated with MoS₂ by Pulsed Laser Deposition / M. Mosleh, S.J.P. Laube, N.P. Suh // Tribol. Trans. – 1999. 42 (3). – P. 495–502.
30. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. – Л.: Машиностроение. –1986. –176с.
31. Ефремов В.Д., Ящерицин П.И. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей. – Мн.: БАТУ, 1997. – 251 с.
32. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дисс. ... докт. техн. наук. – Київ, 2001. – 404 с.
33. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы. Дисс... к.т.н. – Киев, 1997. – 145 с.
34. Ульяненко Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів. Дисс. к.т.н. – Київ, 2006. – 167 с.
35. Майборода В.С. Магнітно-абразивна обробка кінцевого твердосплавного різального інструменту / В.С. Майборода, О.А. Плівак, С.В. Майданюк, В.М. Гейчук // Нові технології в машинобудуванні. – К.: Вісник КДПУ. – 2007. - Вип. 1(42). – Ч. 1. – С. 66-70.
36. Возненко В.В. Поліпшення експлуатаційних характеристик деталей приладів шляхом формування функціональних поверхонь з дискретно-орієнтованою топографією [Текст]: автореф. дисс. на здоб. наук. ступ. к.т.н.: 05.11.14 / Возненко Вікторія Віталіївна. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2006. – 21 с.
37. Антонюк В.С. Вплив ДОТ поверхні на трибологічні характеристики пар тертя / В.С. Антонюк, В.В. Возненко // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2006. – Вип. 32. – С. 71–76.
38. Пат. 13762 Україна, МПК (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / В.Є. Марчук, І.Ф. Шульга, О.І. Шульга, О.Є. Плюсін; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № u200509981; заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.
39. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталевих деталей / В.Є. Марчук, І.Ф. Шульга, Б.А. Ляшенко, Г.В. Цибаньов, А.В. Рутковський, В.В. Калініченко; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200904236; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19.
40. Марчук В.Є. Науково-методологічні основи підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей з текстурованою лунковою структурою в екстремальних умовах

- експлуатацією [Текст]: автореф. дисс. на здоб. наук. ступ. д.т.н.: 05.02.04 – тертя та зношування в машинах / Марчук Володимир Єфремович. – К.: НАУ. – 2017. – 42 с.
41. Кашникова Ю.А. Упрочнение поверхности структурно-неоднородных металлоизделий методом пластической деформации [Текст]: автореф. дисс. на соис. наук. степ. к.т.н.: 05.16.05 – обработка металлов давлением Кашникова Юлия Анатольевна. – Магнитогорск, 1999. – 20 с.

Summary

Marchuk V.E., Lyashenko B.A., Gradysky Y.A. Discrete strengthening of working surfaces by praption methods

The review of discrete hardening of working surfaces by methods of surface-plastic hardening is given. The prospects of their application for increasing the wear resistance of machine parts and mechanisms are shown.

Keywords: discrete hardening, surface-plastic deformation, micro-deepening, grooves.

References

1. Falts K. Ratsionalnyye smazochnyye kanavki v podshipnikakh / K. Falts. – M. – L.: Gosizdat, 1929. – 61 s.
2. Shneyder Y.G. Ekspluatatsionnyye svoystva detaley s reguliruyemym mikro-relyefom / Shneyder Y.G. – L.: Mashinostroyeniye, 1982. – 248 s.
3. Schneider Y.G. Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instrument Parts [Text]/Y.G. Schneider//Precis. Eng. – 1984. – 6. – P. 219–225.
4. Shneyder Y.G. Obrazovaniye regul'yarnogo mikrorelyefa na detalyakh i ikh ekspluatatsionnyye svoystva / Y.G. Shneyder. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 150 s.
5. Shneyder Y.G. Regularizatsiya mikrorelyefov poverkhnostey detaley / Y.G. Shneyder. – L.: LDNTP, 1986. – 24 s.
6. Rezhim dostupu: http://metalat.ru/processing_metal/114-obrabotka-metalla-nakatyvaniem.html.
7. Golubchikov M.A. Modelirovaniye protsessa vibronakatyvaniya / M.A. Golub-chikov, Y.P. Kuzmin // izd. vuzov. Priborostroyeniye. – 2010. –Т. 53, № 8. – S. 26-29.
8. GOST 24773-81. Poverkhnosti s regul'yarnym mikrorelyefom. Klassifikatsiya, parametry i kharakteristiki. 01.07.1982.
9. Pat. 2440232 Rossiya, B24B 39/06. Sposob vibronakatyvaniya ploskostey / Stepanov Y.S., Kirichek A.V., Afanasyev B.I., Sotnikov V.I., Samoylov N.N.; zayavitel i patentoobladatel Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. – № 2010116232/02; zayavl. 23.04.2010.Opubl. 20.01.2012 Byul. № 2.
10. Bukanova I.S. Modelirovaniye protsessa nakatyvaniya chastichno-reguliruyemogo protsessa dlya opredeleniya fakticheskoy ploshchadi / I.S. Bukanova, I.I. Yatlo // Polzunovskiy vestnik. – 2012. – 1/1. – S. 46–50.
11. Pat. 2243877 Rossiya, B24B 39/04, B24B 39/06. Kombinirovannyy sposob ig-lofrezerovaniya s uprochneniyem / Stepanov Y.S., Kharlamov G.A., Kirichek A.V., Tara-panov A.S., Afanasyev B.I.; zayavitel i patentoobladatel Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. – № 2003115186/02; zayavl. 22.05.2003.
12. Radionenko O.V. Mekhanizm granichnogo z mashchuvannya poverkhon tertya z chastkovo regul'yarnim mikrorel'efom ta ikh tekhnologichne zabezpechennya [Tekst]: avtorcf. dis. na zdotuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.04 «Tertya ta znoshuvannya v ma-shinakh / O.V. Radionenko. – Kiyv, 2006. – 20 s.

13. Bulatov V.P. Basics of Machining Methods to Yield Wear and Fretting Resistive Surfaces, Having Regular Roughness Patterns [Text] / V.P. Bulatov, V.A. Krasny, Y.G. Schneider // *Wear*. – 1997. – P. 132–137.
14. Odintsov L.G. Finishnaya obrabotka detaley almaznym vyglazhivaniyem i vibrovyglazhivaniyem / L.G. Odintsov. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 160 s.
15. Klimenko L.P. Povysheniye dolgovechnosti tsilindrov DVS na osnove prin-tsipov perezmennoy iznosostoykosti / pod red. V.V. Zaporozhtsa. — Nikolayev: NF NaUKMA, 2001. — 294 s.
16. Chepovetskiy I.H. Antifriktsionno-deformatsionnyy metod formirovaniya rabochikh poverkhnostey gilz tsilindrov DVS / I.H. Chepovetskiy, S.A. Yushchenko // *Dvigatelistroyeniye*. – 1990. – № 8. – S. 38-40.
17. Pavliskyy V.M. Pidvyshchennya znosostiykosti avtotraktornykh dvyhuniv v pus-kovyyu period [Tekst]/V.M. Pavliskyy. - Ternopil: Vydavnytstvo "Zbruch", 1999. - 200 s.
18. Chernovol M.I. Kombinirovannyi metod obrabotki poverkhnostey treniya / M.I. Chernovol, I.V. Shepelenko, A. Varuma // *Tekhnika v sil'skogospodarskomu virobniatstvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatizatsiya*. – 2011. – Vip. 24, ch. II. – S. 13–16.
19. Patent Ukrayiny na korysnu model №52699, S23B 5/00. Sposib nanesennya an-tyfryktsiynykh pokryt / Kropivnyy V.M., Shepelenko I.V., Chernyavskyy O.V. [ta in.] – Opubl. 10.09.2010, Byul. №17.
20. Isupov M.G. Sozdaniye antifriktsionnoy poverkhnosti struyno-abrazivnoy obrabotkoy / M.G. Isupov // *Treniye i iznos*. – 2005. – T. 26. – №4. – S. 428–433.
21. Khrushchev M.M. Issledovaniye prirabotki podshipnikovikh splavov i tsapf / M.M. Khrushchev. – M.: Mashinostroyeniye, 1946. – 160 s.
22. Eastham D.R. Soft materials for overlays [Text] / D.R. Eastham, C.S. Crooks // *Tribol. ind. Half Day Courses Leeds (17th Sept. 1980)*. – 1980. – P. 1–27.
23. Simdyankin A.A. Issledovaniye iznosostoykosti detaley sloyeno-y konstruktzii / A.A. Simdyankin, Y.V. Krivopalov // *Treniye i iznos*. - 2000 (21). - №4. - S. 433–437.
24. Barinov S.V. Issledovaniye iznosostoykosti detaley s neodnorodnoy poverkhnostyu treniya / S.V. Barinov, B.P. Zagorodskikh, A.A. Simdyankin // *Treniye i iznos*. – 2003 (24). – №5. – S. 568–572.
25. Balabanova N.V. Analiz topografii i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pokrytiy dlya rabochikh elementov mikropintsetov / N.V. Balabanova, S.A. Chizhik, Z. Rimuza // *Treniye i iznos*. – 2006 (27). – №5. – S. 514–519.
26. Saka A. The Role of Tribology in Electrical Contact Phenomena / A. Saka, M.J. Lio, N.P. Suh // *Wear*. – 1984. 100. – P. 77–105.
27. Saka N. Boundary Lubrication of Undulated Metal Surfaces at Elevated Temperatures / N. Saka, H. Tian, N.P. Suh // *Tribol. Trans*. – 1989. 32 (3). – P. 389–385.
28. Suh N.P. Control of Friction / N.P. Suh, M. Mosleh, P.S. Howard // *Wear*. – 1994. 175. – P. 151–158.
29. Mosleh M. Friction of Undulated Surfaces Coated with MoS₂ by Pulsed Laser Deposition / M. Mosleh, S.J.P. Laube, N.P. Suh // *Tribol. Trans*. – 1999. 42 (3). – P. 495–502.
30. Baron Y.M. Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhu-shchego instrumenta. – L.: Mashinostroyeniye. –1986. –176s.
31. Yefremov V.D., Yashcheritsin P.I. Tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva rabochikh kromok instrumenta i detaley. – Mn.: BATU, 1997. – 251 s.
32. Mayboroda V.S. Osnovy stvorenniya i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazyvnoho instrumentu dlya finishnoyi obrobky fasonnykh poverkhon. *Dyss. ... dokt. tekhn. nauk*. – Kyiv, 2001. – 404 s.

33. Stepanov O.V. Issledovaniye protsessa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlya obrabotki detaley slozhnoy geometricheskoy formy. Diss... k.t.n. – Kiyev, 1997. – 145 s.
34. Ulyanenko N.V. Pidvyshchennya pratsezdatsnosti tverdospavnoho instrumentu shlyakhom zastosuvannya mahnitno-abrazyvnoho obroblennya ta nanesennya znosostiykykh pokryttiv. Dyss. k.t.n. – Kyiv, 2006. – 167 s.
35. Mayboroda V.S. Mahnitno-abrazyvna obrobka kintsevoho tverdospavnoho rizalnoho instrumentu / V.S. Mayboroda, O.A. Plivak, S.V. Maydanyuk, V.M. Heychuk // Novi tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – K.: Visnyk KDPU. – 2007. - Vyp. 1(42). – CH. 1. – S. 66-70.
36. Voznenko V.V. Polipshennya ekspluatatsiynykh kharakterystyk detaley prykladiv shlyakhom formuvannya funktsionalnykh poverkhon z dyskretno-oriyentovanoyu topohrafi-yeu [Tekst]: avtoref. dyss. na zdob. nauk. stup. k.t.n.: 05.11.14 / Voznenko Viktoriya Vita-liyvna. – K.: NTUU “KPI”. – 2006. – 21 s.
37. Antonyuk V.S. Vplyv DOT poverkhni na trybolohichni kharakterystyky par tertya / V.S. Antonyuk, V.V. Voznenko // Visnyk NTUU “KPI”. Seriya prykladobuduvannya. – K.: NTUU “KPI”. – 2006. – Vyp. 32. – S. 71–76.
38. Pat. 13762 Ukrayina, MPK (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Prystriy dlya utvorennya na ploskiy poverkhni tertya relyefu zahlybyn, shcho utrymuyut mastylni materialy / V.Y. Marchuk, I.F. Shulha, O.I. Shulha, O.Y. Plyusnin; zayavnyk ta patentovlasnyk Natsionalna akademiya oborony Ukrayiny. – № u200509981; zayavl. 24.10.2005; opubl. 17.04.2006, Byul. № 4.
39. Pat. 44643 Ukrayina, F01L 1/20 C23C 8/02. Sposib otrymannya relyefnykh znosostiykykh azotovanykh shariv stalnykh detaley / V.Y. Marchuk, I.F. Shulha, B.A. Lyashenko, H.V. Tsybanov, A.V. Rutkovskyy, V.V. Kalinichenko; zayavnyk ta patentovlasnyk Na-tSIONalnyy aviatsiyny universytet. – № u200904236; zayavl. 29.04.2009; opubl. 12.10.2009, Byul. № 19.
40. Marchuk V.Y. Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennya znosostiykosti robochykh poverkhon detaley z teksturovanoyu lunkovoyu strukturoyu v ekstremalnykh umovakh ekspluatatsiyeyu [Tekst]: avtoref. dyss. na zdob. nauk. stup. d.t.n.: 05.02.04 – tertya ta znoshuvannya v mashynakh / Marchuk Volodymyr Yefremovych. – K.: NAU. – 2017. – 42 s.
41. Kashnikova Y.A. Uprochneniye poverkhnosti strukturno-neodnorodnykh me-talloizdeliy metodom plasticheskoy deformatsii [Tekst]: avtoref. diss. na sois. nauk. step. k.t.n.: 05.16.05 – obrabotka metallov davleniyem Kashnikova Yuliya Anatolyevna. – Magnitogorsk, 1999. – 20 s.