

Марчук В.Е.<sup>1</sup>,  
Ляшенко Б.А.<sup>2</sup>,  
Градыский Ю.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт проблем прочности  
имени Г.С. Писаренко НАН Украины  
г. Киев, Украина

<sup>3</sup>Харьковский 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 поверхностно-пластического упрочнения. Показано перспективность их применения для повышения износостойкости деталей машин и механизмов.*

**Ключевые слова:** дискретное упрочнение, поверхностно-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 упрочнение 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], были 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].

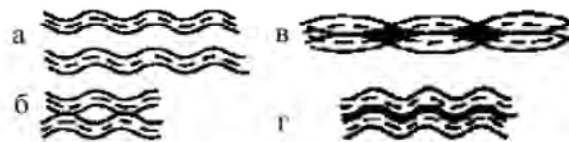


Рис. 1 – Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании:  
а - каналы не касаются друг друга; в - каналы касаются друг друга;  
б - каналы пересекаются; г - каналы накладываются

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].

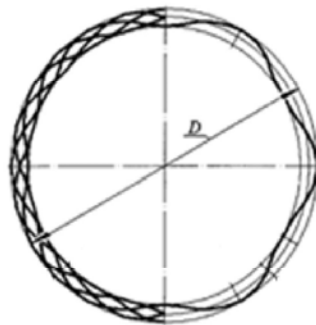


Рис. 2 – Поперечный разрез заготовки после обработки поверхности вибронакатыванием со статико-импульсным нагружением

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).

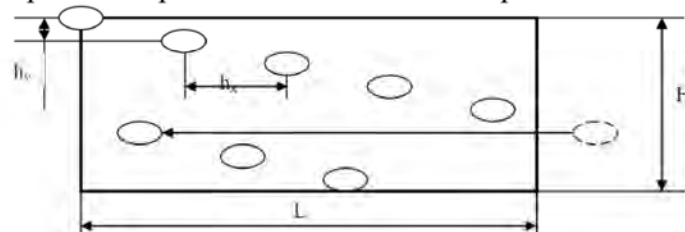


Рис. 3 – Развертка отверстий неподвижных соединений

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 распределения 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].

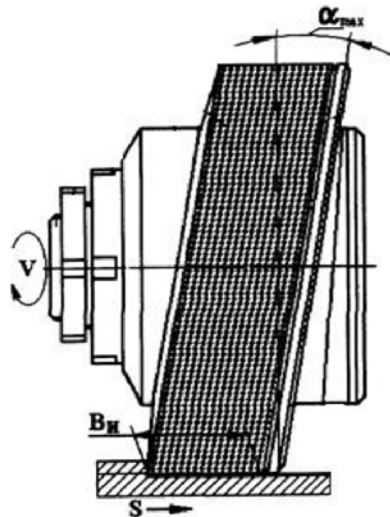


Рис. 4 – Схема обработки комбинированным иглоупрочняющим инструментом:  
 $\alpha_{\max}$  - максимальный угол наклона режущего и упрочняющего слоя

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 трибосконтакта.

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).

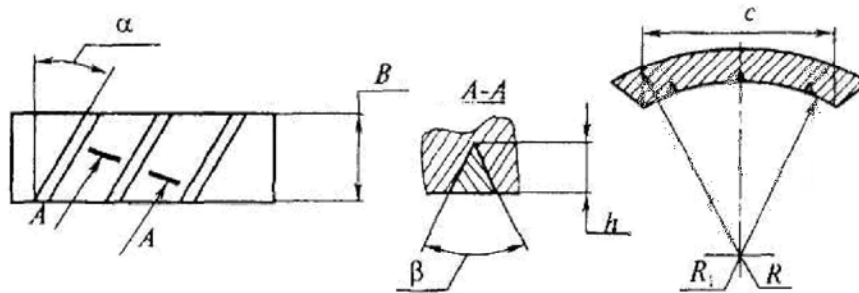


Рис. 5 – Схема расположения канавок на поверхности трения колодки

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 шероховатостью (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  $\varnothing 16$  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 подачи 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 коэффициента трения на 57–62 %, уменьшить период приработки на 10–20 % и увеличить износостойкость в период после приработки в 1,8–2,44 раза [40].

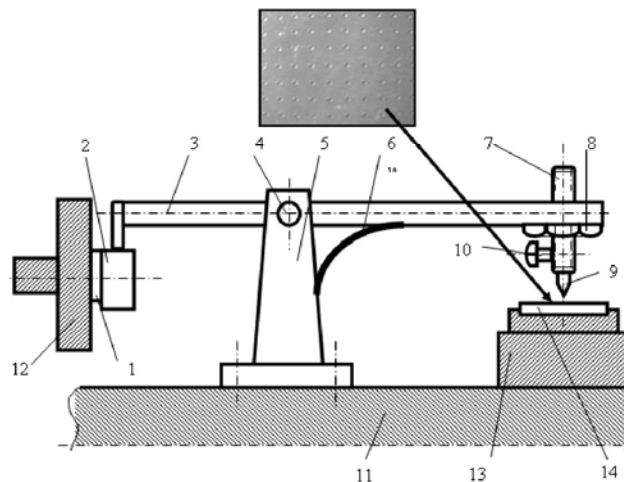


Рис. 6 – Устройство для создания лунок:

- 1 - приводной вал; 2 - кулачок; 3 - коромысло; 4 - ось коромысла; 5 - стоек 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 оброботке 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 образуемым наплывом при последующем ударе (рис. 7) в условиях дробного деформационного воздействия.

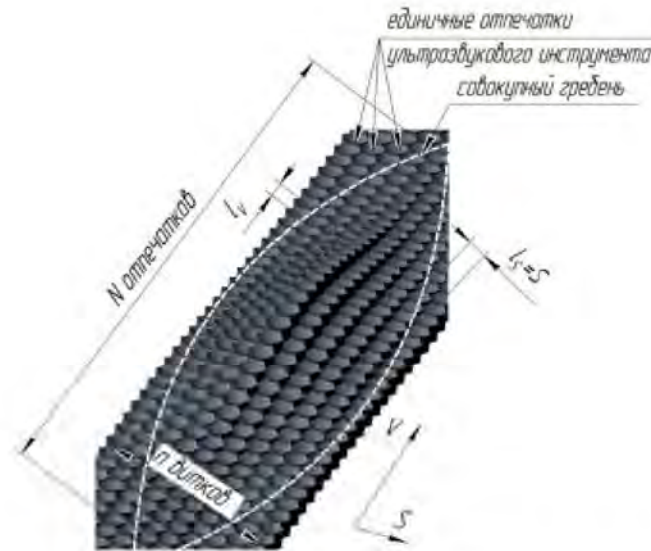


Рис. 7 – Схематическое изображение совокупного гребня волны при ударах инструмента

**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](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 змашування 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. Кривопапов//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 MoS<sub>2</sub> 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. Плюснін; 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 regulyarnogo 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](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 regulyarnym 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 tekhnicheskiy 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. Kombinirovannyi 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 tekhnicheskiy universitet. – № 2003115186/02; zayavl. 22.05.2003.
12. Radionenko O.V. Mekhanizm granichnogo z mashchuvannya poverkhon tertya z chastkovo regulyarnim mikrorel'efom ta ikh tekhnologichne zabezpechennya [Текст]: avtoref. dis. na zdotuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.04 «Tertya ta znoshuvannya v ma-shinakh / O.V. Radionenko. – Kіїв, 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. – 208. – 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 peremennoy 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 znosostiyykosti avtotraktornykh dvyhuniv v pus-kovyyu period [Tekst]/V.M. Pavliskyy. - Ternopil: Vydavnytstvo "Zbruch", 1999. - 200 s.
18. Chernovol M.I. Kombinirovannyy metod obrabotki poverkhnostey treniya / M.I. Chernovol, I.V. Shepelenko, A. Varuma // *Tekhnika v sil'skogospodarskomu virobnitstvi, 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 sloyenooy konstruktсии / A.A. Simdyankin, Y.V. Krivopalov // *Treniye i iznos*. - 2000 (21). - №4. - S. 433–437.
24. Barinov S.V. Issledovaniye iznosostoykosti detaley s neodnorodnoy po-verkhnostyu 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 MoS<sub>2</sub> 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 tverdosplavnoho 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 tverdosplavnoho 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-yeyu [Tekst]: avtoref. dyss. na zdob. nauk. stup. k.t.n.: 05.11.14 / Voznenko Viktoriya Vita-liyivna. – 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.