

УДК 621.787

DOI: 10.30987/article_5d2635cb370c77.32034089

В.Ю. Блюменштейн, д.т.н.

(ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

E-mail: blumensteun@rambler.ru

Инновационные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием в транспортном комплексе

Представлен анализ инновационных технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД). Ключевое внимание уделено статическим методам ППД, средствам оснащения и режимам по направлениям: управление качеством и обеспечение стационарности процесса; обработка нежестких деталей и коленчатых валов; совмещенные и комбинированные технологии; создание наноструктурированного поверхностного слоя.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование (ППД); совмещенная и комбинированная обработка.

V.Yu. Blyumenstein, Dr. Sc. Tech.

(FSBOI HE Gorbachyov State Technical University of Kuzbass, 28, Vesennyaya, Kemerovo, 650000)

Innovation technologies in finish-strengthening with surface plastic deformation in transport complex

The innovation technology analysis of finish-strengthening with surface plastic deformation (FS SPD) is presented. Key attention is paid to SPD static methods, the means of equipment and modes in the following areas: quality control and support of stationarity process; the processing of soft parts and crankshafts; concurrent and combined technologies; the formation of a nano-structural surface layer.

Keywords: surface plastic deformation (SPD); concurrent and combined processing.

Введение

Статические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД) накатыванием и выглаживанием применяются для обработки деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок (валы гладкие, коленчатые и кулачковые; торсионы, полуоси); высоких скоростей относительно перемещения и больших давлений (шатуны, золотники, плунжеры); в условиях абразивного изнашивания (пальцы трака, тормозные диски и барабаны, колеса, детали с/х, землеройных и др. машин) [1]. Основные научные достижения представлены в трудах ведущих ученых – руководителей научных школ: Балтера М.А., Бараца Я.М., Дрозда М.С., Емельянова В.Н., Жасимова М.М., Зайдеса С.А., Киричека А.В., Киселева Е.С., Кудрявцева И.В., Кузнецова В.П., Макушка Е.М., Муханова И.И., Непершина Р.И., Отения Я.Н., Папшева Д.Д., Проскуракова Ю.Г., Розенберга О.А., Рыжова

Э.В., Смелянского В.М., Сорокина В.М., Сулова А.Г., Торбило В.М., Хворостухина Л.А., Цеханова Ю.А., Шнейдера Ю.Г., Юдина Д.Л., Ящерицына П.И. и др. [1, 2].

Управление качеством поверхностного слоя при ППД. Проф. Суловым А.Г. создана научная школа технологического обеспечения и управления качеством поверхностного слоя (ПС) деталей машин. К числу ключевых достижений научной школы можно отнести: научные исследования в области высокоэффективных методов обработки, включая ППД; новые упрочняющие способы и методы обработки и новые технологические процессы; методики, алгоритмы и программы расчета параметров наукоемких технологических процессов; средства технологического оснащения, включая оборудования, оснастку и инструменты для реализации разработанных процессов; методы и алгоритмы управления качеством и эксплуатационными свойствами деталей машин; учение об инженерии поверхности

и научная методология совершенствования существующих и создания новых наукоёмких методов обработки рабочих поверхностей деталей машин.

Этой научной школой в начале 1970-х гг. выполнено исследование по технологическому обеспечению жестких плоских стыков, в котором наряду с шлифованием и торцовым фрезерованием рассмотрены и исследованы методы вибро- и статического накатывания шариковыми головками. Впервые применен термин «Отделочно-упрочняющая обработка ППД (ОУО ППД), который в дальнейшем был стандартизован. Выполнены научные исследования и разработаны технологические процессы, включая средства оснащения, в области изготовления накатыванием гладкорезьбовых соединений. Это позволило существенно упростить конструкции и технологии изготовления шпилек. В итоге снизились затраты на их изготовление за счет значительного расширения поля допуска на средний диаметр и исключения операций сортировки и клеймения. Указанные технологии реализованы на современных станках с ЧПУ [1 – 4].

Проф. Григорьевым С.Н. и проф. Кропоткиной Е.Ю. для управления качеством поверхностного слоя изменением размера и формы пятна контакта было разработано устройство и технология для поверхностного пластического деформирования обкатыванием или выглаживанием (рис. 1) [5]. Регулируя величину давления упрочняющих инденторов на деталь поворотом роликов на угол α , можно управлять параметрами поверхностного слоя по заданному закону упрочнения: структурой, степенью наклепа, распределением остаточных напряжений, величиной шероховатости. Обкатывание по заданному закону и уточненным режимам производится с помощью гидравлической следящей системы.

Обеспечение стационарности процесса ППД. По мнению проф. Неперишина Р.И. стационарный процесс обработки деталей ППД скользящим инструментом с контролем силы, действующей на инструмент, может применяться для пластического упрочнения на заданную глубину по всей ширине плоской поверхности или по замкнутому кольцевому контуру при обработке цилиндрической поверхности детали [6]. Разработаны устройства для ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей, основанные на использовании стационарного пластического течения при скольжении инструмента по обрабатываемой поверхности (рис. 2 и 3).

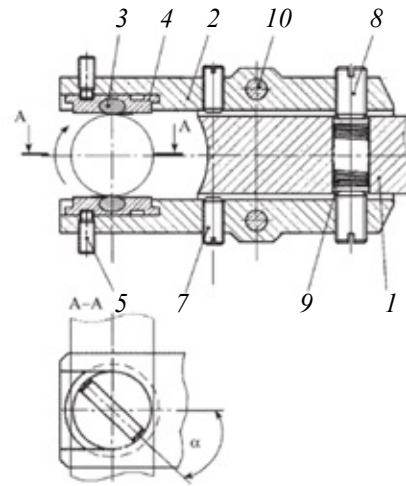


Рис. 1. Устройство для упрочняющей поверхностной обработки цилиндрических деталей:

1 – основание; 2 – составной корпус; 3 – инденторы; 4 – дисковые обоймы; 5 – фиксирующие винты; 7, 8 – регулировочные винты; 9 – система пружин; 10 – ось

Устройство для обработки плоских поверхностей (рис. 2) состоит из разъемного корпуса и цилиндрического инструмента с круговой формой рабочей поверхности, который прижимается с заданной силой к обрабатываемой поверхности детали пакетом тарельчатых пружин. В устройствах для ППД внутренних и наружных цилиндрических поверхностей деталей скользящим упругим кольцом необходимое контактное давление инструмента с криволинейной формой рабочей поверхности создается натягом и упругой жесткостью кольца (рис. 3).

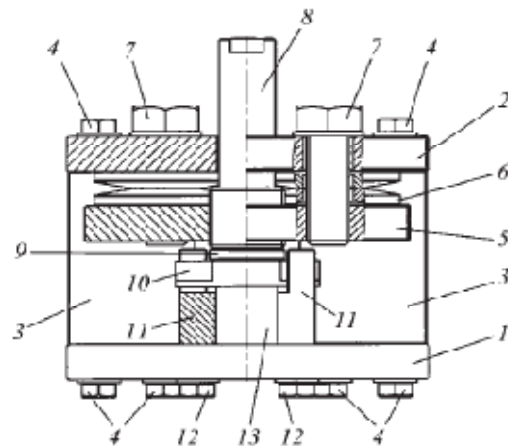


Рис. 2. Устройство для ППД плоской поверхности:

1, 2, 5 – пластины; 3 – корпус; 4, 7, 12 – болты; 6 – пружины тарельчатые; 8 – винт; 9 – муфта; 10 – инструмент; 11 – направляющие; 13 – обрабатываемая деталь

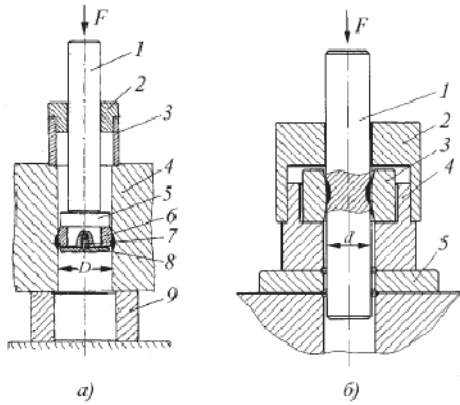


Рис. 3. Устройства для ППД:

а – цилиндрического отверстия: 1 – толкатель; 2 – направляющая втулка; 3 – направляющее кольцо; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – оправка; 6 – скользящее упругое кольцо; 7 – винт; 8 – шайба; 9 – опорное кольцо; *б* – наружной цилиндрической поверхности детали 1 скользящим упругим кольцом 3: 2 – направляющая втулка; 4 – оправка; 5 – опорное кольцо

Обработка ППД нежестких валов. В рамках научной школы проф. Зайдеса С.А. проводятся исследования и разработаны средства технологического оснащения и технологии ППД мало жестких валов, осей, штанг и т.п., применяемых в различных конструкциях металлообрабатывающих станков, текстильных и сельскохозяйственных машин, горнорудных механизмах, железнодорожного транспорта, глубинных насосах и другой технике [2, 7, 8].

Для упрочнения изделий предложены схемы ППД, обеспечивающие постоянство деформирующего усилия по длине детали, что позволило формировать необходимую шероховатость, глубину упрочнения и заданный уровень остаточных напряжений. Результаты научных исследований позволили разработать метод охватывающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), при этом осесимметричное нагружение проводится при силовом замыкании на ограниченном участке упругопластического тела.

Метод реализован в виде двух способов. Согласно первому способу для обработки не жестких валов применяют центробежный обкатник с высокой стабильностью рабочего усилия, простой по конструкции и не требующий значительных затрат времени на настройку (рис. 4). Для создания деформирующего усилия использованы центробежные силы, возникающие при вращении обкатника. Станок, основным элементом которого является рассматриваемая конструкция центро-

бежного обкатника, обеспечивает неизменность рабочего усилия, стабильность деформации и напряжений по длине заготовки при изменении диаметра вала в 3 раза, и высокие показатели качества поверхностного слоя не жестких деталей.

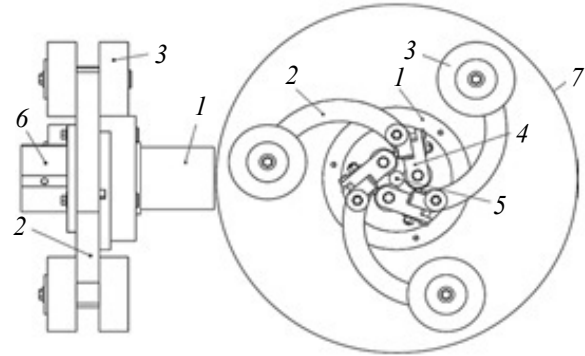


Рис. 4. Схема центробежного обкатника:

1 – корпус и лекало; 2 – криволинейный рычаг; 3 – груз; 4 – державка с деформирующим роликом; 5 – обкатываемая деталь; 6 – дополнительная опора; 7 – защитный кожух

Второй способ основан на использовании жесткой охватывающей матрицы. Предложены технологические схемы охватывающего ППД с ограничениями по жесткости детали, свойствам материала, точности и качеству поверхностного слоя. Достижениями научной школы проф. Зайдеса С.А. являются разработанные на уровне изобретений инновационные способы, изготовленные и внедренные в действующее производство России оборудование и оснастка для охватывающего деформирования: универсальный станок для охватывающего деформирования для упрочнения длинномерных деталей; полуавтомат для охватывающего деформирования относительно коротких деталей типа осей и втулок длиной до 500 мм и диаметром до 50 мм в условиях серийного производства; автоматизированное устройство для охватывающего деформирования к универсальному прессу; станок для упрочнения концевых участков валов; станок для строчного упрочнения цилиндрических деталей; автоматизированные устройства для правки готовых изделий, обеспечивающие их геометрическую стабильность и др.

ППД коленчатых валов. Проф. Емельяновым В.Н. создано новое научное направление повышения качества прямых и коленчатых валов ППД [9]. Выполнены научные исследования и разработан механизм коробления, в соответствии с которым при упрочнении гал-

телей ППД зона пластической деформации распространяется и на шейку, и на щеку. Разработаны алгоритмы и программы для коленчатых валов различных видов, позволяющие рассчитать величину и направление коробления в зависимости от режимов ППД. Разработаны способы и устройства, с помощью которых можно править прямые и коленчатые валы в широком диапазоне конструктивных параметров. Способы просты в реализации и обеспечивают достаточно высокую точность (до 0,01...0,02 мм) и сопротивление усталости.

Совмещенные и комбинированные технологии ППД. В рамках научной школы проф. Татаркина Е.Ю. коллективом ученых предложен способ и устройство для совмещенной обработки деталей точением и обкатыванием с гидроприводом, который одновременно с размерной и упрочняющей обработками обеспечивает подготовку поверхности к нанесению покрытий на детали, в том числе и с плотными оксидными пленками (рис. 5) [10]. В результате обработки на стальных образцах одновременно с упрочнением происходило образование медного покрытия на поверхности детали. Исследования показали, что наличие медного слоя на поверхности обеспечивает снижение износа до 35 % в сравнении с обкатанными деталями без нанесенного медного покрытия. Решение задачи формирования покрытия на алюминиевых образцах заключается в удалении оксидной пленки Al_2O_3 и образовании чистой ювенильной поверхности.

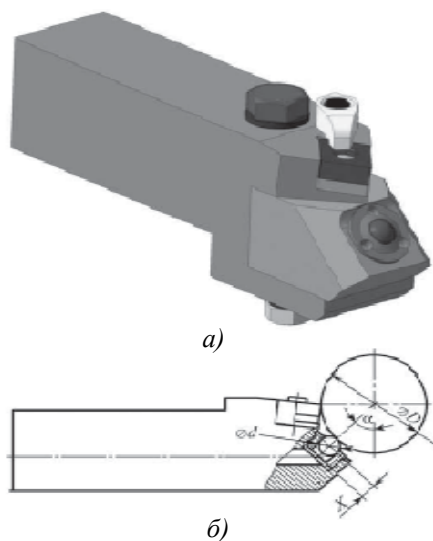


Рис. 5. Инструмент для совмещенной обработки деталей:
а – 3D-модель; б – схема обработки

Проф. Сорокиным В.М., Танчуком С.С., Зотовым В.А. и др. разработано многофункциональное комбинированное устройство, позволяющее по сравнению с известным инструментом повысить качество обрабатываемой поверхности, ее триботехнологические характеристики, стойкость режущего и деформирующего элементов, производительность обработки. Это достигается за счет одновременной подачи в зоны обработки резцом и деформирующим элементом (вибрирующим шариком) под давлением напорных струй технологических жидкостей (СОЖ и РАС – раствора технологической смеси) (рис. 6) [11].

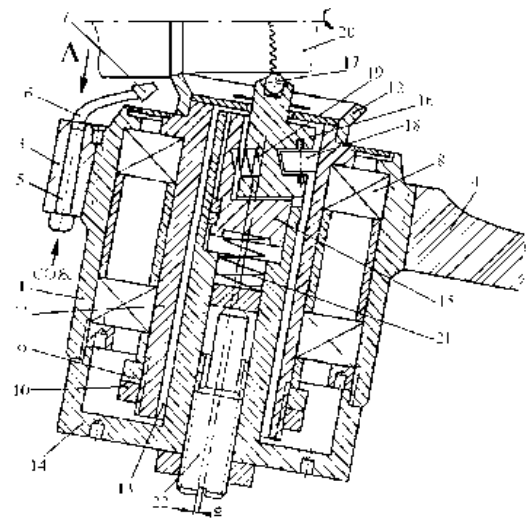


Рис. 6. Многофункциональное устройство для режущо-деформирующей обработки с нанесением антифрикционных покрытий

Технология позволяет формировать антифрикционно-упрочненный поверхностный слой с высокими триботехническими характеристиками. При этом происходит повышение износостойкости и задиростойкости соответственно в 3 и 10 раз, снижение времени приработки трущихся деталей до 5 раз, коэффициента трения в 1,5 – 2 раза. Кроме того повышается стойкость резца в 1,5–2 раза, деформирующего элемента (шарика) более 10 раз и производительность обработки в 3 – 4 раза за счет совмещения операций технологического процесса. Точность заготовки повышается на 3–4 квалитета.

Ультразвуковая обработка ППД. В рамках научной школы проф. Муханова И.И. выполняются исследования процессов ультразвуковой обработки (УЗО) ППД [12, 13]. Гилета В.П. с соавторами отмечают, что в транспортной технике широко используются методы холодной листовой штамповки; при этом ключевое значение имеет стойкость вытяжных пуансонов. Комбинирование методов хи-

мико-термической обработки с ППД позволило повысить износостойкость и усталостную прочность деталей машин и инструментов.

Разработан комплекс технологий УЗО ППД жестко закрепленными свободными деформаторами. Авторами показана эффективность замены отделочных абразивных методов обработки коренных и шатунных шеек коленвалов ДВС средней мощности ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработкой с достижением требуемой точности и шероховатости поверхности. Галтели могут быть обработаны ППД по методу копирования или обкатывания. Обкатывать галтели и цилиндрическую часть коленвала можно как отдельно, так и совместно.

С точки зрения производительности и однородности поверхностного слоя целесообразно их обрабатывать за одну наладку одним инструментом. Зубчатые колеса были обработаны по технологии УЗО ППД; в итоге момент трогания снизился на 18 %, а КПД привода повысился на 12 %. В результате производительность обработки выросла в 8 раз по сравнению с операцией доводки, существенно снизилась себестоимость, в том числе, и за счет устранения операции электрополирования отверстий.

В рамках научной школы проф. Смелянского В.М. выполняются научные исследования ППД, включая комбинированные и совмещенные процессы [14, 15]. Предложен, исследован и разработан высокопроизводительный процесс размерного совмещенного обкатывания (PCO) валов, осей, штоков и др. Обкатывание осуществляется двумя или тремя роликами, жестко настроенными на определенный размер обработки детали.

В зону волнообразования помещена режущая пластина, частично или полностью удаляющая волну металла, возникающую впереди деформирующих инструментов (рис. 7, а). Вторая схема с предварительным срезанием слоя металла применяется при обработке «черных» поверхностей (рис. 7, б).

PCO позволяет создавать натяги деформирующих инструментов до 1,0 мм без разрушения металла поверхностного слоя; обеспечивает точность обработки до IT 8–9 при исходной IT 14; шероховатость не более $Ra = 0,4$; глубину упрочнения до 10 мм; повышение усталостной прочности до 2,5–3 раз. Технология и оборудование применяются для обработки деталей автомобилей, строительно-дорожных машин, деталей силовой гидравлики горных машин и др.

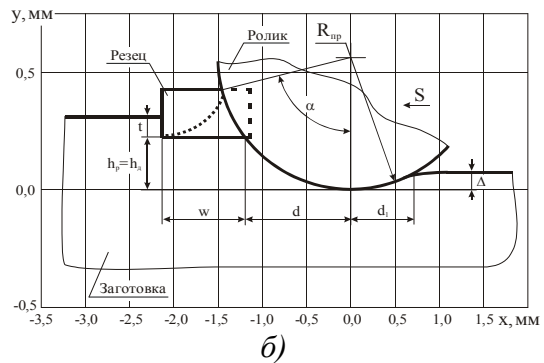
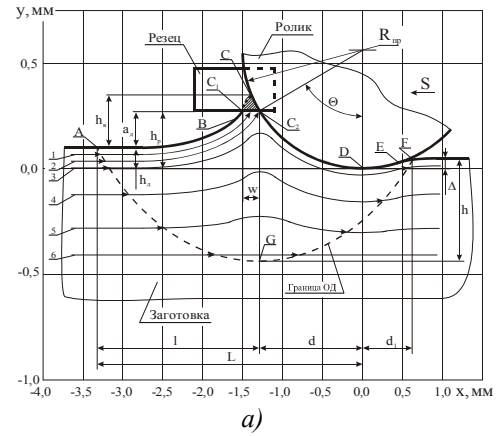


Рис. 7. Схемы очага деформации при обработке размерным совмещенным обкатыванием по первой (а) и второй (б) схемам

Разработаны комплекты конструкторской документации станка для обработки PCO (рис. 8 и 9).

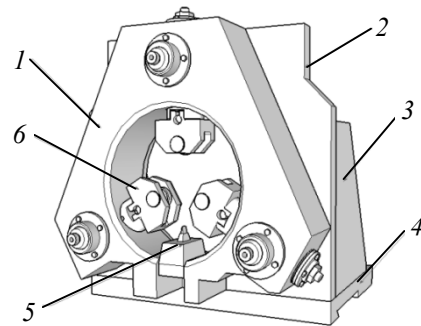


Рис. 8. Общий вид устройства для PCO:

1 – корпус; 2 – опорная стойка; 3 – ребра жесткости; 4 – плита; 5 – режущий блок; 6 – накатные головки

Создание наноструктурированного поверхностного слоя. Проф. Маркус Л.И. одним из первых обнаружил эффект получения ультрамелкозернистых структур в процессе исследования влияния алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства дорожек качения подшипников, изготовленных из стали ШХ-15

[16]. Практическая реализация исследования привела к созданию прогрессивной технологии финишной обработки деталей подшипников, обладающих высокими показателями надежности. Оптимальные режимы алмазного выглаживания при упрочнении колец из стали ШХ-15 могут быть назначены с учетом тонкого кристаллического строения металла.

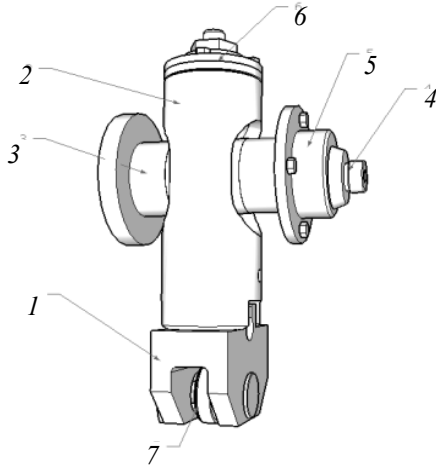


Рис. 9. Накатная головка:

1 – роликовый узел; 2 – ползун; 3 – втулка; 4 – лимб; 5 – стакан; 6 – корпус

В рамках научной школы проф. Киричека А.В. выполняются исследования, разрабатываются способы и процессы статико-импульсной обработки. Разработан способ градиентного упрочнения, использующий для пластического деформирования ударные волны, создающие высокое давление в очаге деформации и формирующие большую глубину упрочненного поверхностного слоя [17, 18].

Упрочненный поверхностный слой формируется в результате многократных импульсных воздействий, образованных ударными волнами в ударной системе боек-волновод (рис. 10). Способ деформационного упрочнения ударными волнами позволяет регулировать равномерность распределения более мелких и крупных измельченных частиц. Создается гетерогенная ультрамелкозернистая градиентно упрочненная структура, чередующая твердые и пластичные участки по заданному закону, которая более эффективно повышает эксплуатационные свойства материала. Установлено наличие измельченных частиц размером до 100...300 нм; высокая концентрация наночастиц обнаружена в поверхностном слое на глубине 3...8 мм. Установлено чередование измельченных частиц определенных размеров вдоль упрочненного поверхностного слоя.

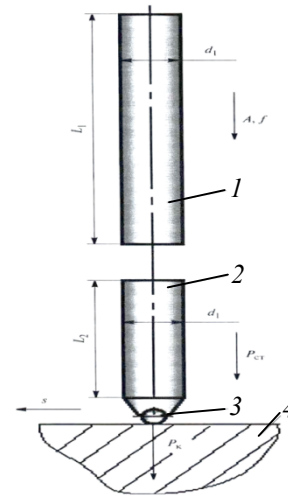


Рис. 10. Схема нагружения поверхности детали при упрочнении волной деформации:

1 – боек; 2 – волновод; 3 – инструмент; 4 – упрочняемая поверхность

В рамках научного направления проф. Кузнецова В.П. выполнены исследования в области наноструктурирующего выглаживания [19]. Наноструктурирование поверхностных слоев практически любых металлических материалов достигается при фрикционном воздействии инденторами из твердых материалов (твердый сплав, Al_2O_3 и др.). Нанокристаллическая структура образуется за счет ротационно-сдвигового механизма интенсивной пластической деформации. Созданы специальные инструменты с встроенной системой отвода тепла от индентора путем подачи СОТС под давлением. Показано, что, например, наноструктурирующее выглаживание стали 20Х13 по сравнению с технологией электрополирования приводит к повышению износостойкости поверхностного слоя при трении по кремнию в 1,6 раза, а по пластине из стали 12Х18Н10Т – в 2,4 раза. Данный процесс повышает малоцикловую усталость, по сравнению с обработкой шлифованием, до 10 раз.

Авторы [20] показали, что по большинству характеристик структуры и свойств приповерхностных слоев металлов процессы обкатывания и выглаживания имеют много общего с хорошо изученными методиками интенсивной пластической деформации (ИПД) равноканальным угловым прессованием (РКУП) и кручением под давлением (КПД).

Электронно-микроскопические исследования внутри слоев выявили зерна наноскопических размеров, углубления, оставшиеся от вырванных нанофрагментов и скопления вырванных при обкатке нанозерен. Авторы пола-

гают, что обкатывание шариком может повысить не только отражательную способность поверхности, но и привести к изменению электропроводности, теплопроводности, пластичности. Наноструктура тонкого поверхностного слоя должна замедлять химические реакции (окисление и др.).

Разработаны новые конструкции деформирующих инструментов, имеющих сложный рабочий профиль [21]. Отличительными признаками предлагаемых конструкций являются: возможность варьирования в широких пределах геометрии рабочих профилей, как в радиальном, так и в осевом направлении, создавать в очаге деформации большие натяги деформирующих элементов, создавать сложное напряженное состояние с преимущественным большим гидростатическим давлением и получения больших деформаций с относительно низкой степенью исчерпания запаса пластичности металла. Так, в частности, ролик обкатной мультирадиусный (МР-ролик) имеет форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов (ДЭ) с радиусами постоянной величины, расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлениях (рис. 11 и 12).

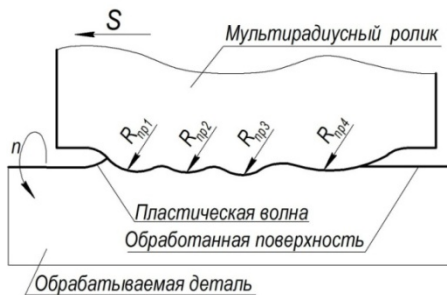


Рис. 11. Схема поверхностного пластического деформирования мультирадиусным инструментом

Установлено, что обработка МР-роликом приводит к существенному возрастанию плотности дефектов кристаллической решетки в поверхностном слое, увеличению его микротвердости в ≈ 2 раза, а также к деформационно-индуцированному растворению цементитных частиц Fe_3C . Выявленные закономерности процесса упрочнения мультирадиусным инструментом с высоким гидростатическим давлением и большим числом участков квази-монотонной деформации свидетельствуют о накоплении существенных деформаций (упрочнении) без разрушения металла, что по-

зволяет повысить свойства обкатанных изделий в условиях приложения эксплуатационных нагрузок.

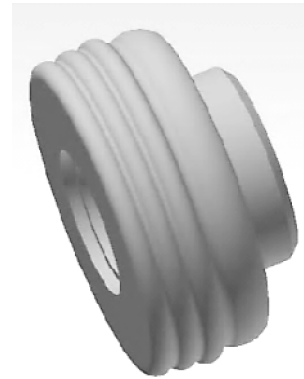


Рис. 12. 3-D модель мультирадиусного ролика

Проф. Цехановым Ю.А. с соавторами разработан способ и процесс модифицирования изделий из титановых сплавов с целью создания нано- и мелкодисперсных структур деформационного происхождения [22]. Такой результат удалось получить в ходе формования и деформационного упрочнения сферической заготовки накатыванием между двумя параллельными вращающимися плоскостями (рис. 13). Предложенную технологию можно рекомендовать для поверхностного упрочнения и других деталей полносферической формы.

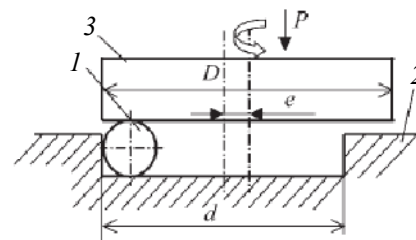


Рис. 13. Схема накатывания сферической заготовки плоскими поверхностями:

1 – сферическое изделие; 2 – цилиндрическая камера; 3 – вращающийся инструмент

По мнению автора, актуальными направлениями развития статических методов ППД являются: разработка способов и устройств комбинированной и совмещенной обработки: ППД в комбинации с резанием, термической и химико-термической обработкой, обработкой плазмой, лазером, ультразвуком, нагревом, нанесением многофункциональных покрытий и др.; совершенствование конструкций устройств для ППД, создание автоматизирован-

ного оборудования, разработка технологий для обработки различных изделий на станках с ЧПУ; разработка способов и устройств, повышающих пластичность металла, что достигается созданием высоких гидростатических давлений в соответствующих зонах очага деформации, наложением мощного ультразвука, построением рациональных программ нагружения; моделирование процессов, прогнозирование параметров поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей, использование расчетных алгоритмов и физических методов неразрушающего контроля; автоматизация проектирования, в том числе, создание цифровых двойников и цифровых теней; разработка специализированного программного обеспечения; разработка, адаптация и применение эффективных методов контроля металла ПС, учитывающих тонкие физические явления, включая, акустико-эмиссионные, акустико-структурометрические, метод магнито-шумового анализа, метод магнитной памяти металла и коэрцитиметрии и др.

Особую актуальность приобретают исследования, ориентированные на создание наноструктурированного состояния металла поверхностного слоя и учет тонких физических явлений в наноразмерном диапазоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулов, А.Г. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2-х т. Т.1 / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение. – 2014. – 480 с.; Т.2 – 444 с.
2. Зайдес, С.А. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. д.т.н., проф. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ. – 2015. – 396 с.
3. Качество машин: справочник. В 2-х т. Т.2 / А.Г. Сулов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский [и др.]. – М.: Машиностроение. – 1995. – 430 с.
4. Сулов, А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении / А.Г. Сулов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный [и др.]; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение. 2012. – 528 с.
5. Григорьев, С.Н., Кропоткина, Е.Ю. Технологическое управление качеством поверхностного слоя по заданному закону упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 9. – С. 8-12.
6. Непершин, Р.И. Поверхностное пластическое деформирование скользящим инструментом // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 6. – С. 19-22.
7. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография / И.Р. Асланян, А.С. Бубнов [и др.]; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2014. – 560 С.
8. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования: монография / В.Ю. Блюменштейн, А.В. Киричек [и др.]; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 404 С.
9. Емельянов, В.Н. Правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. – Новгород: НовГУ, 1996. – 127 С.
10. Беляев, В.Н., Татаркин, Е.Ю. Повышение износостойкости деталей нанесением меди на поверхность при обкатывании с гидроприводом // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 7. – С.3-6.
11. Сорокин, В.М., Танчук, С.С., Зотова, В.А. и др. Устройство для режущо-деформирующей обработки валов с нанесением антифрикционных покрытий // СТИН. – 2012. – № 9. – С. 38–40.
12. Муханов, И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. – М.: Машиностроение. 1978. – 44 с.
13. Гилета, В.П., Асанов, В.Б., Безнедельный, А.И. Обработка шеек коленчатых валов ультразвуковым инструментом // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2007. – № 7. – С. 8-12.
14. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
15. Блюменштейн, В.Ю., Смелянский, В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
16. Маркус, Л.И., Смелянский, В.М. Алмазное выглаживание. – М.: НИИН Автопром, 1971. – 116 с.
17. Соловьев, А.Г., Лазуткин, А.Г. и др. Упрочнение тяжело нагруженных деталей методом статикоимпульсного ППД / Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, С.А. Силантьев // СТИН. – 2002. – № 5. – С. 13–15.
18. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Кузьменко, А.П. Использование ударных волн деформации для наноструктурирования металлических материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 8. – С. 17-22.
19. Кузнецов, В.П. Финишная технология наноструктурирующего выглаживания поверхностных слоев при обработке деталей машиностроения на многоцелевых станках // Нанотехника. – 2014. – №2. – С. 86-89.
20. Классен, Н.В., Классен, Е.Н., Мышляев, М.М., Клубович, В.В., Кулак, М.М. Формирование регулярных наноструктур шариковой обкаткой металлов и перспективы применений // VII Междун. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 7-10 ноября 2017 г. // Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН. – 2017. – С. 279-281.
21. Блюменштейн, В.Ю., Кукареко, В.А. Структурные превращения в поверхностном слое при обработке мультиметрическим деформирующим инструментом // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инстру-

менты. – 2018. – Т. 20. – №2. – С. 75-83.

22. Цеханов, Ю.А., Шейкин, С.Е., Карих, Д.В., Сергач, Д.А. Упрочнение накатыванием шаровой опоры из чистого титана эндопротеза тазобедренного сустава человека // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 4. – С. 21-23.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Technology and Tools of Finish-Strengthening of Parts with Surface Plastic Deformation*: reference book in 2 Vol. Vol.1 / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. – 2014. – pp. 480; Vo.2 – pp. 444.

2. Zaides, S.A. *Encyclopedia of Surface Plastic Deformation* / under the editorship of Prof. S.A. Zaides. – Irkutsk: IR-RITU Publishers. – 2015. – pp. 396.

3. *Machinery Quality*: reference book. In 2 Vol., Vol.2 / A.G. Suslov, Yu.V. Gulyaev, A.M. Dalsky [et al.]. – M.: Mechanical Engineering. – 1995. – pp. 430.

4. Suslov, A.G. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. 2012. – pp. 528.

5. Grigoriev, S.N. Kropotkina, E.Yu. Technological control of surface layer quality on specified law of strengthening // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2012. – No.9. – pp. 8-12.

6. Nepershin, R.I. Surface plastic deformation with sliding tool // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2010. – No.6. – pp. 19-22.

7. *Parts Processing with Surface Plastic Deformation*: monograph / I.R. Aslanyan, A.S. Bubnov [et al.]; under the editorship of S.A. Zaides. – Irkutsk: IrSTU Publishers. 2014. – pp. 560.

8. *Engineering Processes of Surface Plastic Deformation*: monograph / V.Yu. Blyumenstein, A.V. Kirichek [et al.]; under the editorship of S.A. Zaides. – Irkutsk: IrSTU Publishers, 2007. – pp. 404.

9. Emeliyanov, V.N. *Machinery Leveling with Surface Plastic Deformation*: monograph. – Novgorod: NovSU, 1996. – pp. 127.

10. Belyaev, V.N., Tatarkin, E.Yu. Wear-resistance in parts by copper application on surfaces at running-in with hydraulic drive // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2012. – No.7. – pp. 3-6.

11. Sorokin, V.M., Tanchuk, S.S., Zotova, V.A. et al. *Device for Shaft Cutting-Deforming Processing with Anti-friction Coatings* // STIN. – 2012. – No. 9. – pp. 38-40.

12. Mukhanov, I.I. *Machinery Pulse Finish-Strengthening by Ultrasonic Tool*. – M.: Mechanical Engineering. 1978. – pp. 44.

13. Gileta, V.P., Asanov, V.B., Beznedelny, A.I. Crankshaft journal processing with ultrasonic tool // *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. – 2007. – No.7. – pp. 8-12.

14. Smelyansky, V.M. *Mechanics of Parts Strengthening with Surface Plastic Deformation*. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 300.

15. Blyumenstein, V.Yu., Smelyansky, V.M. *Mechanics of Technological Inheritance at Stages of Machinery Processing and Operation*. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 400.

16. Markus, L.I., Smelyansky, V.M. *Diamond Smoothing*. – M.: RIIN Autoprom, 1971. – pp. 116.

17. Soloviyov, A.G., Lazutkin, A.G. et al. *Heavy-duty Parts Strengthening by Method of Static-Pulse SPD* / D.L. Soloviyov, A.G. Lazutkin, A.V. Kirichek, S.A. Silantiev // STIN. – 2002. – No.5. – pp. 13-15.

18. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Kuzmenko, A.P. Deformation shock wave use for metal nano-structuring // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.8. – pp. 17-22.

19. Kuznetsov, V.P. Finishing technology of surface layer nano-structuring smoothing at engineering parts processing on multi-purpose machines // *Nano-engineering*. – 2014. – No.2. – pp. 86-89.

20. Klassen, N.V., Klassen, E.N., Myshlyaev, M.M., Klubovich, V.V., Kulak, M.M. Regular nano-structure formation with metal ball running-in and outlooks of use // *The VII-th Inter. Conf. "Material and Nano-material Deformation and Destruction"*. Moscow. November 7-10, 2017. *Proceedings*. – M.: IMET RAS. – 2017. – pp. 279-281.

21. Blyumenstein, V.Yu., Kukareko, V.A. Structural transformations in surface layer at processing with multi-radius deforming tool // *Metal Processing. Technology. Equipment. Tools*. – 2018. – Vol.20. – No.2. – pp. 75-83.

22. Tsekhanov, Yu.A., Sheikin, S.E., Karikh, D.V., Sergach, D.A. Strengthening with pure titanium ball bearing rolling of endo-prosthesis of human hip joint // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2013. – No.4. – pp. 21-23.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдес