

## ЛЕКЦИЯ-13

### ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И УПОРЯДОЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Одним из эффективных методов повышения качества обрабатываемых поверхностей деталей и их эксплуатационных свойств являются процессы ППД при ударно-импульсном воздействии инструмента и комбинированная обработка. При данных видах обработки происходит изменение физического, химического, структурного состояния поверхностного слоя, повышающие его механические, физико-химические свойства, формирование РМР с неровностями одинаковой высоты и пологой формы выступов и впадин с радиусами на 1-2 порядка больше, чем при обработке резанием, обеспечивающих повышенную маслостойкость контакта, увеличенную нагрузочную способность, лучший теплоотвод из зоны трения, что обеспечивает быстрый и благоприятный переход от исходного (технологического) качества поверхностного слоя к оптимальному рабочему в процессе эксплуатации.

Ниже рассматриваются данные методы и прогрессивные конструкции инструментов, внедренные в заводскую практику, либо опробованные в лабораторных и производственных условиях.

#### **Ударно-импульсная упрочняющая обработка**

Под ударно-импульсной обработкой (УИО) понимаются способы ППД с усложненной кинематикой движения деформирующего инструмента (центробежно-ударное, виброударное накатывание, вибронакатывание, вибровыглаживание и др.), объединенные общими признаками ударноимпульсного воздействия на микронеровности металла и регуляризацией характеристик его поверхности.

Отличительными особенностями способов УИО по сравнению с другими способами ППД являются:

При УИО инструмент (рабочая среда) деформирует микронеровности и тонкий слой металла импульсно, с высокой частотой энергетически равных и одинаково направленных импульсов нагружения обрабатываемой заготовки, что обеспечивает идентичность условий обработки по всей обрабатываемой поверхности.

Высокая скорость соударения инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки, достигающая (10...100) м/с. Высокая скорость деформирования металла обрабатываемой заготовки, примерно на два порядка выше, чем при статических способах ППД. Волновые процессы, сопровождающие УИО, возникновение упругих и пластических волн напряжений.

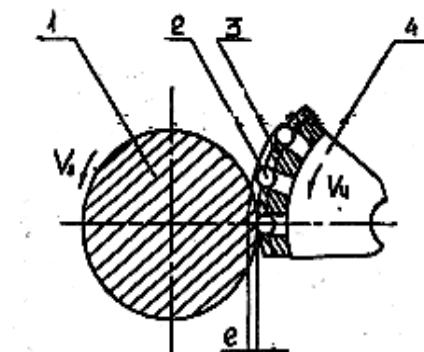
Высокий уровень напряжений, возникающих под действием ударно приложенной нагрузки, в 10 и более раз выше, чем при статических способах ППД.

Кратковременность действия ударной нагрузки –  $(10^{-3} \dots 10^{-6})$  с. Высокая мгновенная температура (более 600 С), возникающая в зоне контакта, однако, ввиду кратковременности ее действия, значительного снижения прочности металла не происходит.

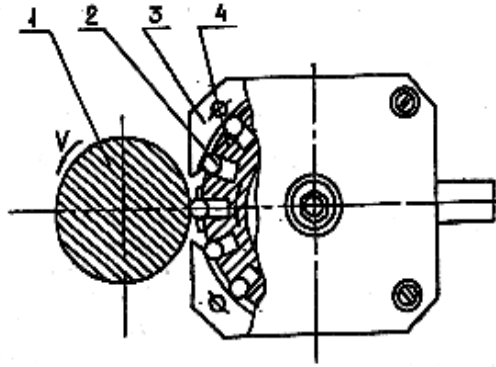
Одним из прогрессивных способов УИО являются центробежно-ударное и виброударное накатывание. В основу разработанного в 1976 г. [16] способа центробежно-ударного накатывания положена схема центробежно-шариковой обработки с помощью упрочнителей (устройств) конструкции Ененко-Кузьмина (рисунок 1).

Под центробежно-ударным накатыванием понимается способ обработки, когда поверхностное пластическое деформирование осуществляется ударами инструментов под воздействием одновременно действующих инерционных и центробежных сил (в отличие от известного способа Ененко-Кузьмина, где сила удара является следствием только инерционных сил шариков).

Схема устройства для центробежно-ударной обработки показана на рисунке 2.



**Рисунок 1 – Устройство для центробежно-ударного накатывания**



**Рисунок 2 – Устройство для центробежно-ударной обработки**

В конструкции устройства применен неподвижный закрытый корпус 3 с отверстием, через которое деформирующие элементы (шарики) 2 наносят удар по поверхности обрабатываемой заготовки 1. Отсутствие высокоточного, а поэтому и сложного в изготовлении сепаратора (см. конструкцию устройства на рисунке 1) обеспечивает следующие преимущества:

- значительно упрощаются конструкция, технология изготовления и сборка устройства;
- повышается качество обработки и однородность наклепа поверхностного слоя деталей вследствие устранения неодинакового выступания шариков по диаметру ротора устройства, имеющее место в других известных конструкциях из-за неточности изготовления гнезд под шарики в сепараторе и погрешностей сборки;
- уменьшается, в некоторых случаях совсем устраняется влияние погрешностей геометрической формы: конусообразности, эллипсности, седлообразности и т.п. на однородность наклепа поверхностного слоя деталей;
- снижаются требования к статической и динамической балансировке;
- повышается надежность и долговечность работы устройства без замены основных его элементов;
- обеспечивается удобство смазки при обработке изделия (исключается ее разбрызгивание);
- не требуется специального оградительного кожуха;
- возможность создания переносных устройств, в том числе и ручных, работающих от воздушной или электросети с использованием пневмоили электромашинки, для обработки крупногабаритных тяжелых изделий, деталей со сложным профилем поверхности.

Процесс обработки с помощью устройств данного типа легко осуществляется на токарных, шлифовальных, фрезерных и строгальных станках как общего, так и специального назначения, станках с ЧПУ, а также с помощью ручных электро и пневмомашин. Для работы корпус 3 закрепляют, например, в резцедержателе токарного станка, а диск соединяют со специальным приводом, обеспечивающим его вращение. Устройство подводится к обрабатываемой заготовке 1, откидывается заслонка, удерживающая шарики от выпадания в нерабочем состоянии, затем

включаются станок и привод вращения диска. За счет центробежных сил шарики 2 перемещаются в радиальном направлении и занимают крайнее положение, прижимаясь к корпусу с некоторым усилием. В зоне отверстия в корпусе шарики, свободно перемещаясь на величину  $1/2 \dots 2/3$  своего диаметра, сталкиваются с обрабатываемым изделием и под действием центробежных и инерционных сил происходит наклеп его поверхности.

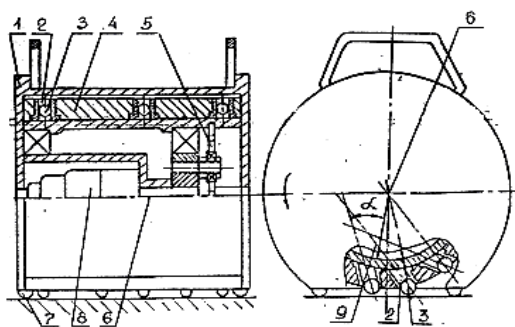
На основе рассмотренного способа центробежно-ударной обработки нами и другими исследователями разработаны новые инструменты для отделочно-упрочняющей обработки рабочих поверхностей деталей.

На рисунке 3. показано устройство для обработки крупногабаритных плоских и криволинейных металлических поверхностей шариками. Устройство содержит корпус 1, внутри которого размещен сепаратор 4. На ободе сепаратора выполнены гнезда 2, расположенные в плоскостях, перпендикулярных к продольной оси сепаратора. В гнездах 2 свободно размещены стальные шарики 3.

Для увеличения энергии единичного удара стального шарика по обрабатываемой поверхности каждое гнездо на ободе сепаратора расположено под углом к прямой, соединяющей ось 6 сепаратора с центром выходного отверстия соответствующего гнезда 2, при этом угол находится в пределах от  $3$  до  $60$ .

Вращение сепаратора осуществляется от встроенного в корпус 1 электропривода 8 через зубчатую передачу 5. Шариковые опоры 7 служат опорой и средством для перемещения устройства.

Устройство работает следующим образом. Установив его на обрабатываемую металлическую поверхность, включают электропривод, который через зубчатую передачу приводит во вращение сепаратор 4. Под действием центробежных сил, возникающих при вращении сепаратора, шарики выступают над периферией обода и наносят удары по обрабатываемой поверхности. Передвигая вручную устройство на шариковых опорах 7, можно обрабатывать поверхность любых заданных размеров.



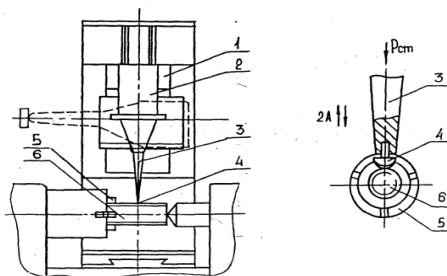
**Рисунок 3 – Устройство для обработки металлических поверхностей шариками**

1 – корпус; 2 – гнездо; 3 – шарик; 4-сепаратор; 5 – зубчатая передача; 6 – ось;  
7 – опоры; 8 – электропривод; 9 – прямая

Основные технологические параметры процессов центробежно ударного накатывания: импульс (сила) удара  $Q$ ; скорость деформирующего элемента  $V_{ин}$ ; диаметр (радиус) деформирующего инструмента (шара)  $d_{ин}$  ( $r_{ин}$ ); натяг ( $e$ ).

Накатывание рекомендуется производить с применением смазочно-охлаждающей жидкости: масло индустриальное 20 или его смесь с 2-3% олеиновой кислоты, или же раствор глицерина 70-80%, органической кислоты 5-10%, воды. При наличии смазки снижается коэффициент трения, температура контактных поверхностей, что оказывает определенное влияние на протекание процесса деформации, и способствует получению менее шероховатой (на 1-2 класса) поверхности, большей глубине упрочненного слоя металла ( $h_n = 0,1 \dots 0,35$ ;  $\sigma_{сж} = 600 \dots 1200$  МПа).

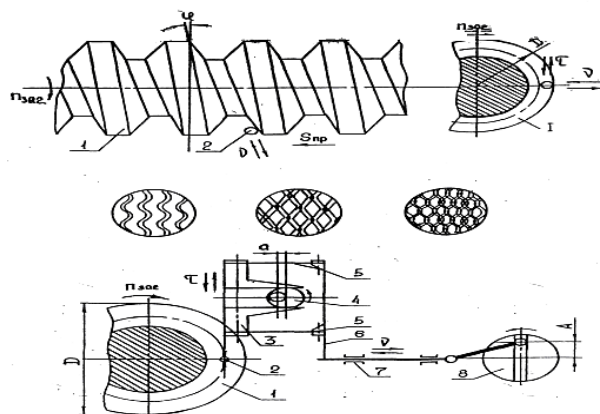
Среди способов обработки ударом широкие перспективы имеют процессы ударного вибронакатывания. На рисунке 4 показана принципиальная схема устройства для виброударного накатывания витков резьбы ходовых винтов. Обработка ведется на обычном токарновинторезном станке с помощью ультразвуковой головки специальной конструкции, установленной в резцедержателе. Питание головки производится от ультразвукового генератора УЗГ-0,4 мощностью 0,4 кВт. Обрабатываемый винт закрепляется в центрах станка, подводится суппорт с установленной в нем головкой, инструмент которой имеет профиль, соответствующий профилю обрабатываемой резьбы, и производят одновременное включение станка и головки в работу. Скорость вращения винта (12...16) об/мин, продольная подача инструмента соответствует шагу обрабатываемой резьбы. Другие параметры обработки устанавливаются в зависимости от применяемого вида инструмента. Применение данных устройств показало их высокую эффективность как в улучшении качественных характеристик поверхностного слоя витков резьбы: достигнута шероховатость  $Ra = 0,32$  мм, повысилась микротвердость на (10...15)%, величина остаточных напряжений сжатия (400...500) МПа, так и в повышении их эксплуатационных свойств: износостойкости в (1,5...2) раза, контактной выносливости на (50...80)%.



**Рисунок 4 – Схема устройства для отделочно- упрочняющей обработки резьб ультразвуковым способом:**

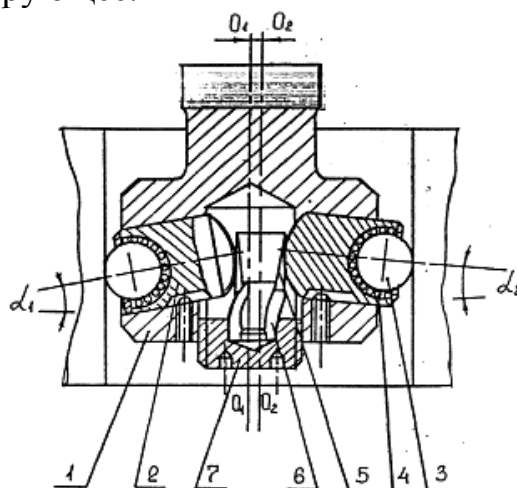
1 – корпус; 2 – магнитострикционный преобразователь; 3 – полуволновый концентратор; 4 – рабочий инструмент; 5 – патрон; 6 – обрабатываемая деталь

На рисунке 5 показана принципиальная схема вибронакатывания винтовой поверхности с образованием регулярного микрорельефа 3-х типов в соответствии с ГОСТ 24773-81.



**рисунок 5– Схемы вибронакатывания винтовых поверхностей**

Обрабатываемой детали 1 от шпинделя токарно-винторезного станка сообщается вращательное движение с частотой  $n_3$ , а виброголовке, установленной в резцедержателе – продольная подача  $S_{np}$ , равная шагу винта. Деформирующий элемент 2 виброголовки, прижимаемый силой  $P$  и обрабатываемой поверхности получает колебательные движения во взаимно перпендикулярных направлениях: в радиальном за счет возвратнопоступательного перемещения ползуна 7 кривошипного механизма 8 и в тангенциальном – путем преобразователя вращательного движения эксцентрика 4, установленного в пазу скобы 3, закрепленной с помощью плоских пружин 5 на кронштейне 6, жестко связанному с ползуном 7 – в поступательное осциллирующее.

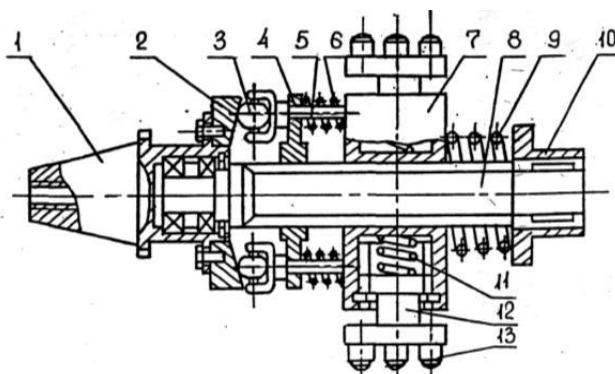


**Рисунок 6 – Раскатчик для вибронакатывания внутренних цилиндрических поверхностей**

При обработке раскатчик вводится в обрабатываемое отверстие со смещением относительно оси последнего. При этом деформирующие элементы

3 воздействуют на обрабатываемую поверхность с силой, определяемой жесткостью и величиной деформации нажимного конуса 5, выполненного в виде втулки с равномерно изменяющейся толщиной стенки. При вращении раскатника вокруг оси  $O_1-O_1$ , не совпадающей с осью  $O_2-O_2$  отверстия, гильзы 2 с деформирующими шариками перемещаются в отверстиях корпуса. Одновременно с радиальным перемещением гильз происходят их осевые возвратно-поступательные колебания, величина которых зависит от эксцентриситета и углов наклона гильз. При установке гильз под разными углами к оси вращения конуса они будут колебаться в осевом направлении с разной амплитудой, что позволит получить сложный регулярный микрорельеф обработанной поверхности.

Для вибронакатывания (вибровыглаживания) шариками, алмазными наконечниками предназначено устройство (рисунок 6), обеспечивающее обработку поверхностей крупногабаритных деталей с заданной микрогеометрией. Оно состоит из шлицевой оправки 8, установленной на подшипниках в расточке посадочного конуса 1, к фланцу которого прикрепляют сменные кулачки 2. Другим концом шлицевая оправка входит в втулку 10 и фиксируется в ней с помощью шпонок. Две пары взаимно перпендикулярных пазов втулки, устанавливаемой в подвеске станка, позволяют фиксировать оправку в одной из четырех позиций (конструктивно позиций может быть больше). На средней части оправки устанавливают корпус четырехпозиционного накатника. Пружиной 9 корпус накатника прижимается через толкатели 5 к поверхности кулачка. Толкатели входят по скользящей посадке в люнетный фланец 4. При перекачивании по профильной торцевой поверхности кулачка роликов 3, закрепленных на толкателях, пружины 6 сжимаются или разжимаются, задавая корпусу накатника вибрации. В каждом из четырех накатников 12 устанавливают по несколько отделочно-упрочняющих инструментов-инденторов 13, в виде алмазных наконечников (или стальных шариков).



**Рисунок 7– Устройство для вибронакатывания (вибровыглаживания)**

Обработка осуществляется следующим образом. Расположив инденторы в накатнике соответственно заданному микрорельефу обрабатываемой поверхности, производят поворот его вокруг собственной оси в шлицевых отверстиях корпуса, придавая тем самым ему необходимое положение. После

этого устанавливают в заданной позиции оправку, ориентируясь относительно шлицев втулки 10. Оправка приводится во вращение от шпинделя станка. От сменного кулачка через толкатели задается осциллирующее движение подпружиненному корпусу и, соответственно, накатникам с инструментом. В зависимости от усилия поджатия инденторов пружиной 11 к обрабатываемой поверхности обеспечивается определенная глубина внедрения наконечника инструмента в поверхностный слой детали. Таким образом, на обрабатываемую поверхность наносится заданный тип того или иного регулярного микрорельефа.

### **Комбинированная упрочняющая обработка**

Комбинированная упрочняющая обработка (КУО) представляет собой сочетание различных воздействий на материал при последовательной или совмещенной обработке его, вызывающих при этом действие нескольких физико-химических явлений.

Эффективность построения комбинированных методов обработки определяется закономерностями суммирования воздействий физических и химических явлений, определяющих процесс съема или перераспределение материала при пластическом деформировании. Возникающие при обработке явления зависят от следующих факторов:

- числа и наименований подводимых физико-химических воздействий (процессов);
- способа подвода каждого воздействия в зону обработки и характер размещения их между собой в пространстве и времени;
- количественных характеристик, совмещаемых воздействий и прежде всего величины энергии каждого из них и соотношения их значений между собой.

Указанные признаки положены в основу разработки как большинства известных, так и вновь созданных процессов комбинированной упрочняющей и иной обработки. Рассмотрим некоторые примеры.

### **Комбинированное упрочнение нанесением покрытий в сочетании с ППД.**

Сущность такой обработки, получившей название комбинированной антифрикционно-упрочняющей обработки (КАУО) заключается в том, что на рабочую поверхность заготовки, обработанную точением, шлифованием, другим способом с шероховатостью  $Ra = (2,5 \dots 1,25)$  мкм, очищенную и обезжиренную в специальных растворах, наносится одним из известных способов (электролитическим, механическим и т.п.) антифрикционное или износостойкое (однослойное или многослойное) покрытие (серебро, кадмий, медь, дисульфид молибдена и т.д.), которое затем подвергается обработке одним из способов ППД. При этом наиболее эффективными с точки зрения обеспечения высоких эксплуатационных характеристик деталей являются способы ППД с усложненной кинематикой движения инструмента (центробежно-ударное, виброударное накатывание, вибронакатывание, вибровыглаживание и др.). Целенаправленное усложнение кинематики движения инструмента за счет использования низких или высокочастотных

(ультразвуковых) колебаний, ударов интенсифицирует процесс воздействия деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность заготовки с покрытием и приводит, с одной стороны, к сокращению длительности акта воздействия инструмента ( $10^{-3} \dots 10^{-6}$  с), локальности пластической деформации, высокому уровню действующих напряжений, активизации физико-механических и химических процессов в зоне контакта инструмент-заготовка, а с другой стороны, регулярное чередование воздействий (колебаний, ударов) с высокой частотой приводит к сложным волновым процессам, протекающим в поверхностном слое заготовки. Все это оказывает существенное влияние на механизм формирования всего комплекса параметров качества поверхностного слоя.

В результате указанной обработки на поверхности заготовки формируется новый регулярный микрорельеф со строго закономерно расположенными (элементами) одинаковой высоты и пологой формы выступов и впадин с радиусами скругления на 1...2 порядка большими, чем при обработке резанием и, естественно, большей величиной опорной поверхности как исходной – после образования РМР, так и после приработки.

Формирование регулярного микрорельефа позволяет управлять такими параметрами поверхности, а следовательно, и контакта поверхностей, как фактическая ее площадь и фактическая площадь контакта, а также создавать высокочистые (не шаржированные абразивом) поверхности достаточной маслостойкости, полностью устраняющие такие явления в эксплуатации, как схватывание, фреттинг-коррозия и т.п.

В процессе КАУО под действием высоких температур и больших удельных давлений, возникающих в зоне контакта инструмент-заготовка, происходит пластическая деформация металла покрытия и металла заготовки. Снятие неровностей и пластическое деформирование тончайших слоев металла заготовки осуществляется через тонкие металлические пленки (покрытие), отличающиеся высокой пластичностью и сопротивлением продавливания деформирующего инструмента, что исключает непосредственный контакт его с металлом заготовки. При этом давление инструмента распределяется более равномерно в объеме деформированного металла, а пластическая деформация протекает более плавно и на большую глубину заготовки. Вследствие этого полнее происходит выравнивание структурной неоднородности металла заготовки. Поскольку материал наносимых покрытий значительно отличается физико-механическими, химическими свойствами, то пластическое состояние его оказывает существенное влияние на структуру металла заготовки, действуя как поверхностно-активное вещество.

Поверхностное пластическое деформирование заготовки с покрытием приводит к изменению кристаллографической текстуры покрытия и тонкого слоя металла заготовки. Уменьшается (даже совсем исчезает) количество кристаллитов базисной ориентации и образуется новая текстура с определенной кристаллографической ориентировкой. В тончайшем поверхностном слое появляется новое направление скольжения, начинают

действовать как базисные, так и пирамидальные, то есть, комбинированные, системы скольжения, и поэтому возрастает способность к пластической деформации поверхностного слоя в эксплуатации, несмотря на его упрочнение.

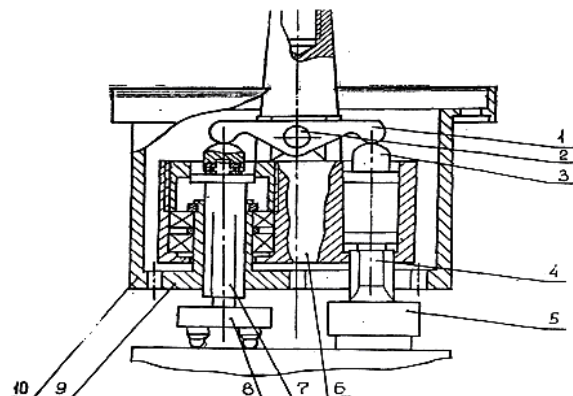
Волновые процессы, в частности упругие и пластические волны напряжений, возникающие при ППД с усложненной кинематикой движения инструмента, осуществляют своеобразный механизм массопереноса т.е. транспортировки в тело заготовки в зоне контакта инородного металла, т.е. частиц покрытия. Так как пластическая деформация осуществляется путем перемещения и размножения дислокаций, следствием движения и взаимодействия которых является образование большого числа точечных дефектов – вакансий и дислокационных атомов с высокой диффузионной подвижностью, то в поверхностном слое при комбинированной обработке будут иметь место диффузионные процессы. При этом происходит проникновение атомов металла покрытия в тонкий верхний слой металла заготовки, а атомы металла, наоборот, диффундируют в кристаллическую решетку металла покрытия, искажая и увеличивая размеры элементарных ячеек. Подобные диффузионные процессы, происходящие при сравнительно низких температурах в покрытии и металле заготовки в процессе КАУО, обусловлены повышенной подвижностью их атомов, что связано со снижением энергий кристаллических решеток при протекании пластической деформации в обрабатываемых металлах (покрытии и заготовки).

Во всех случаях при комбинированной антифрикционно-упрочняющей обработке наблюдается формирование диффузионных слоев толщиной от десятых долей до нескольких десятков мкм. Самый верхний тончайший слой (~5 мкм) представляет собой твердые растворы металлов заготовки в металлах покрытий, а также различные интерметаллические соединения. Затем следуют диффузионные слои, представляющие уже твердые растворы металла покрытия в металле заготовки. Причем большая величина диффузионного слоя (50 мкм и более) отмечается у деталей из углеродистых сталей (стали 20 и 45) с покрытиями, имеющими большой коэффициент диффузии (*Mo*, *MoS<sub>2</sub>*, *Zn*).

Микротвердость нанесенных покрытий после обработки способами ППД повышается на (30...60)%. Колебание значений микротвердости как по поверхности образца, так и по глубине поверхностного слоя (в разных местах) практически отсутствует (1...3%). Отмечается более плавный характер кривых распределения микротвердости по глубине. Аналогичные изменения наблюдаются при исследовании остаточных напряжений. Величина их (600...1000 МПа), на поверхности образцов, как правило, максимальна и охватывает большую глубину слоя металла (30...50 мкм). Кривые распределения остаточных напряжений до глубине поверхностного слоя также имеют более плавный вид по сравнению с результатами, полученными на образцах, упрочненных без покрытия. Отмечается устойчивость остаточных напряжений к релаксации как при нормальных, так и при повышенных температурах (600 С).

Таким образом, при одновременном протекании процессов пластического деформирования, волновых явлений, диффузии происходит комплексное изменение и регулирование, в зависимости от параметров режима обработки, геометрических, механических, физических, структурных, химических и других параметров качества и свойств поверхностного слоя, являющихся следствием действия характеристик наклепа, перераспределения легирующих элементов и изменения химического состава металлов. Целенаправленное изменение параметров качества поверхностного слоя приводит к резкому повышению и стабилизации эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей.

На рисунке 8 показана ротационная установка с алмазными наконечниками, предназначенная для отделочно-упрочняющей обработки плоскостей с одновременным нанесением смазочно-упрочняющих паст и покрытий.



**Рисунок 8 Ротационная установка с алмазными наконечниками**

Она может быть установлена на вертикально-фрезерный станок. При вращении корпуса 6, расположенного в шпинделе станка, зубчатое колесо 9 взаимодействует с зубчатым венцом корпусной втулки 10, неподвижно закрепленной на станке. Шток вращается в подшипниках вместе с конусом относительно его оси и вокруг собственной оси от зубчатой пары.

Сменные накатники 8, установленные в штоке 7, имеют инденторы в виде алмазных (или стальных) наконечников. Шток 4 связан с капсулой 5. Коромысла 1, качающиеся вокруг оси 2, кинематически связаны со штоками 4 и 7 и при вращении периодически воздействуют на них через толкатели 3. Воздействию инденторов на обрабатываемую поверхность предшествует нанесение смазочной упрочняющей пасты, суспензии покрытия или другой массы, например, смеси графита с дисульфидом молибдена. Это достигается выбором направления вращения головки, при этом капсулы со смазкой должны находиться впереди инденторов. Смазка равномерно выдавливается штоками. Усилия прижима инденторов и капсулы к поверхности регулируются автоматически.

Предложенные конструкции устройств позволяют одновременно осуществлять покрытие поверхности детали и её упрочнение, что расширяет

их технологические возможности, снижает трудоемкость изготовления деталей, повышает производительность обработки.

При данной комбинированной обработке в результате физико-химических процессов, происходящих между, рабочей средой и металлом обрабатываемой детали, структурных и фазовых превращений в объеме поверхностного слоя детали формируется новый антифрикционный поверхностный слой с высокими стабильными физико-химикомеханическими свойствами. Подобное состояние поверхностного слоя в совокупности с измененным микрорельефом обеспечивающим повышенную маслостойкость контакта, увеличенную нагрузочную способность, лучший теплоотвод из зоны трения, способствует быстрому и благоприятному переходу исходного (технологического) качества поверхностного слоя к оптимальному эксплуатационному.

Все это, как показали исследования позволяет:

- а) в 2-3 раза сократить длительность приработки и снизить приработочный (начальный) износ образцов и деталей из различных материалов;
- б) в 2-5 раз в зависимости от условий испытаний (эксплуатации) повысить износостойкость образцов (деталей) из высокопрочных материалов (стали 30ХГСН2А, 18Х2Н4ВА, сплав ВТ 3-1, ВТ 16 и др.);
- в) расширить пределы работоспособности пар трения из исследуемых материалов как по удельной нагрузке, так и по температуре;
- г) в 5-10 раз повысить сопротивление образованию задиров и схватыванию, в частности деталей из титановых сплавов и нержавеющей сталей;

Сравнительные испытания на усталостную прочность показали:

- а) пределы усталости стальных образцов после КАУО при испытаниях в условиях коррозионной среды (вода, 20 С) повышаются на 100% и более;
- б) пределы усталости ( $\sigma_{an}$ ) резьбовых деталей (шпилька) из материалов 30ХГСН2А, 13Х15Н4АМЗ, 14Х17Н2, ВТ 3-1, ВТ 16 после КАУРФ в зависимости от способа УИО повышаются на (28...69)%, по сравнению с деталями, резьба которых нарезана резцом; малоцикловая долговечность этих же деталей при  $\sigma_{max} = (0,7...0,8)\sigma_s$  после КАУРФ повышается в (1,5...2,5) раза;
- в) малоцикловая долговечность шаровых вкладышей шасси из материалов 12ХНЗА, 18Х2Н4ВА после КАУО (ЭИО плюс ЦУО или обкатки роликом) повышается более чем в 2 раза.

Коррозионная стойкость стальных образцов в условиях морской воды, влажного воздуха, а также натуральных деталей, низкорасположенных, незащищенных от атмосферных условий шарнирных соединений шасси после КАУО повышается на порядок и более. Это обеспечивается как за счет образования микрорельефа пологой формы с большими радиусами закругления впадин и выступов, так и за счет уплотнения и закрытия сквозных пор в покрытиях и тонком слое металла, снижавших коррозионное проникновение и воздействие агрессивной окружающей среды.

Способы УИО и КАУО значительно повышают герметичность и долговечность работы уплотнительных соединений гидро и пневмосистем.

Вибро-накатывание и вибровыглаживание рабочих поверхностей деталей прецизионных пар (гильза-золотник) устраняют заклинивание и схваты вание, повышают чувствительность, точность перемещения и плавность хода деталей демпферов, бустеров и др. гидроагрегатов.

В результате КАУРФ происходит значительное снижение (в 2-4 раза) и стабилизация величин коэффициентов трения в резьбе соединений из титановых сплавов и нержавеющей сталей при многократном свинчивании. Это устраняет нестабильность затяжки резьбовых соединений, обеспечивая высокую точность заданного усилия, что особенно важно при затяжке групповых резьбовых соединений, когда требуется осуществить равномерную и одинаковую затяжку всех болтов соединения.