

ориентация структурных зерен металла в поверхностном слое повышает стойкость поверхности к образованию трещин разгара в импульсных машинах. Аналогичные примеры промышленного положительного использования ППД можно продолжить.

Обработка ППД с нагревом сопровождается небольшим увеличением микро твердости поверхностного слоя и не сопровождается возникновением в слое каких либо напряжений [8]. Кстати, и при холодной обработке выглаживанием наличия напряжений не обнаружено.

#### Список литературы:

- [1] Бутенко В.И. Выбор управляемых параметров при моделировании отделочно-упрочняющей обработки деталей машин./ В.И. Бутенко, А.Д. Кудинский // Сб. X Международной науч. техн. конф. «Прогрессивные технологии в современном машиностроении», Пенза 2014, С. 7–11.
- [2] Бутенко В.И. Методические основы исследования пластического структурирования материала при отделочно-упрочняющей обработке деталей./ В.И. Бутенко // Сб. X Международной науч. техн. конф. «Прогрессивные технологии в современном машиностроении», Пенза 2014, С. 12–15.
- [3] Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностно пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002, - 300 с.
- [4] Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
- [5] Рыкалин, Н.И. Обработка металлов лазером / Н.И. Рыкалин. – М.: Машиностроение, 1982. – 336 с.
- [6] Лифшиц Э.И. Материаловедение в вопросах и ответах / Э.И. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 375 с.
- [7] Сорокин В.М. Прогрессивные отделочно-упрочняющие способы обработки / В.М. Сорокин. – Горький : ГПИ, 1981. – 82 с.
- [8] Котельников В.И. Основы резания металла с нагревом Монография.– Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011.-199с.

**В.М. Сорокин, А.А. Тихонов, В.В. Иванов, А.А. Ефремов**

*ФГБОУ ВПО «НГСХА»*

**А.В. Михеев**

*ФГБОУ ВПО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»*

**Е.С. Танчук**

*ПК ООО «Спектр-Б».*

## МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АНТИФРИКЦИОННЫХ ПЛЕНОК, ПРИ ВИБРОДОРНОВАНИИ

Ключевые слова: изделия-детали, поверхностный слой, капиллярные системы, вибродорнование, технологические жидкости и УЗК.

Рассматривается механизм формирования антифрикционноупрочненного поверхностного слоя деталей через капиллярные системы, образующиеся при вибродорновании с УЗК в жидкостях. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Большинство эксплуатационных свойств деталей машин зависит от качества их поверхностей, формируемого на заключительных этапах различных технологических процессов. Часто такими этапами являются процессы поверхностно-пластического деформирования (ППД) в сочетании с покрытиями, комбинированная обработка с использованием различных видов энергии (КАУО и др.). В связи с этим значительный научный интерес представляет механизм формирования качества поверхности при

данных процессах. Рассмотрим это на примере комбинированной обработки поверхности отверстия дорном с подачей в зону контакта антифрикционных суспензий (раствор РАС нанопорошков меди, олова, свинца и др. в глицерине, воде и органических кислотах) и воздействие низко- и высокочастотных колебаний на дорн (НЧК) и раствор РАС (УЗК).

Механизм формирования антифрикционно-упрочненного поверхностного слоя (АУПС) при низкочастотном вибродорновании с УЗК технологической среды заключается в следующем: под воздействием суммарных нормально направленных элементарных сил  $N_{\Sigma c}$  (от дорна и РАС раствора суспензии), действующих в зоне контакта, происходит накопление и суммирование упругопластических деформаций и сдвиг частиц металла в поверхностном слое в продольно-поперечном направлении с образованием перед дорном волны внеконтактной деформации металла. В пределах этой волны поверхностный слой получает прогиб в связи с выпучиванием и сдвигом, испытывает деформацию растяжения с соответствующим его удлинением (см. рисунок).

При этом в зоне деформации формируется активная дислокационная структура с высокими растягивающими напряжениями, что увеличивает химическую активность поверхности, максимальные растягивающие напряжения возникают на гребне волны, и в этом случае химическая активность поверхности еще больше (на порядок) повышается.

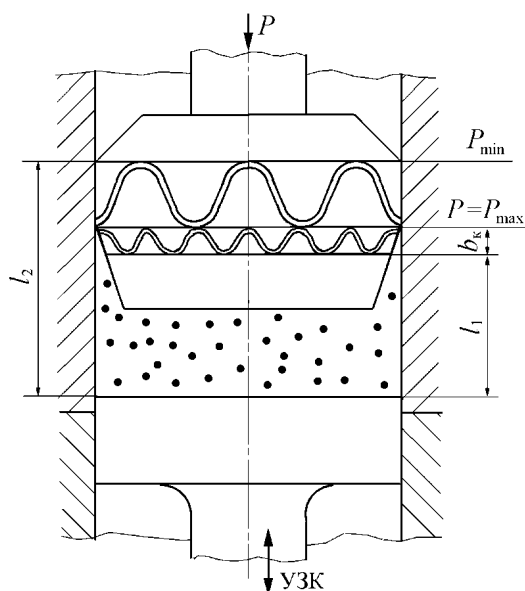


Рис. 1. Схема вибродорнования

Размеры деформационной волны: высота  $h_w$ , длина  $\lambda$  и расстояние  $L$  от начала контакта деформирующего пояса инструмента до её вершины можно определить следующими эмпирическими зависимостями:

$$h_w = K_1 \cdot K_2 \cdot R_{z \text{ исх}} \cdot \lg S_d,$$

$$\lambda = 2,46 \cdot i^{0,12} \cdot d^{0,5} \cdot t^{0,46} \cdot HB^{-0,07} \cdot K_2,$$

$$L = 0,478 \cdot i^{0,15} \cdot d^{0,64} \cdot t^{0,48} \cdot HB^{-0,12} \cdot K_3,$$

где  $i$  и  $d$  – натяг и диаметр деформирующего элемента дорна соответственно;

$t$  – толщина стенки заготовки;

$HB$  – твердость по Бринеллю;

$K_1, K_2, K_3$  – коэффициенты, зависящие от свойств РАС ( $K_1=1,2-1,4$ ;  $K_2=1,5$ ;  $K_3=0,6-0,7$ ),

$S_d$  – подача дорна,

$R_{z\text{исх}}$  – исходная шероховатость заготовки перед дорнованием.

В поверхностном слое металла в очаге деформации происходят реакции, подчиняющиеся законам неравновесной термодинамики, что приводит к образованию более прочных, чем в обычных условиях, связей между формирующимся из РАС композиционным покрытием и основой. При этом активированные УЗК наночастицы антифрикционных металлов из РАС сближаются друг с другом и с обрабатываемой поверхностью детали, возникает их прочный физический контакт, схватывание и образование соединений в твердой фазе. Проходящий затем процесс частичного упругого восстановления отпечатков деформированного материала заготовки с внедренными элементами покрытия сопровождается возникновением в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, которые обеспечивают повышение прочности сцепления покрытия с основной и качество обработанной поверхности детали.

Таким образом, при совмещении в одной операции виброколебаний дорна с частотой до 900 кол/мин и высокочастотных 18–20 кГц колебаний излучателя-волновода происходит значительное увеличение и усиление функциональных параметров обработки. Возникает дополнительная кинетическая энергия в столбце РАС, зависящая от параметров системы установки: амплитуд и частот колебаний, размеров дорна и синусоидальных канавок, капилляров и других пустот в поверхностном слое. Кроме того, возникают различные электрофизические явления, сопровождающие процесс вибродорнования, в частности, электромагнитные поля, которые неизбежно появляются при трении инструмента о поверхность обрабатываемого металла, аналогично процессу фреттинга. При этом мельчайшие (нано) частицы РАС покрываются оболочкой, в состав которой входят ферромагнитные компоненты, образуя композицию, получившей название магнитной микрокапсулы (по В.Н. Латышеву и др.). Под действием электромагнитного поля, имеющего свое максимальное значение в зонах вершины волны, микрокапсулы приобретают движение к зоне контакта инструмента с металлом заготовки, причем их кинетическая энергия постоянно возрастает при движении к зоне контакта. В совокупности указанные выше эффекты определяют высокую проникающую способность РАС в зону контакта обработки и, следовательно, формируют АУПС в обрабатываемых изделиях.

Оценку эффективности данной обработки проводили при комплексном исследовании цилиндрических образцов и деталей типа втулок, гильз с внутренним диаметром 30–50 мм, толщиной стенки 7,5–15 мм, длиной 200–400 мм из сталей 40Х, 30ХГСА (НВ 185–210), получивших распространение при изготовлении цилиндров различных гидро-пневмоагрегатов. Обработку проводили на модернизированном гидравлическом прессе-пульсаторе типа ПА-413 с частотой колебаний 300–600 кол/мин при следующих условиях и режимах, полученных экспериментальным путем: исходная точность заготовки 9–11 квалитет, шероховатость  $R_z=12\text{--}20$  мкм; дорны из материалов ШХ-15, Т15К6 с двумя синусоидальными канавками (патент РФ №132750) шириной 2,5–3 мм, глубиной 2,5–4 мкм, натяг 0,1–0,25 мм, угол заборного конуса 2,5–4°, скорость дорнования 2–4 м/мин, частота вибраций волновода головки УЗК 18–20 кГц. Состав РАС масс %: медь хлорная – 10, олово двуххлористое – 3–4, стеариновая кислота – 0,5, уксусная кислота – 8–10, мочевины (карбомид) – 1, дисульфид молибдена – 4, вода – 10, глицерин – остальное.

Параметры качества поверхностного слоя: характеристики микрорельефа, микротвердость  $H_u$  и твердость по Бринелю НВ, микроструктуру, а также эксплуатационные характеристики: износо- и задиростойкость, коэффициент трения, изучали с помощью известных стандартных методик и приборов, приведенных в работах ИМАШ, ВИАМ (проф. И.В. Крагельский, Ю.Н. Дроздов, А.М. Сулима и др.), а также наших исследованиях.

В результате было выявлено, что совмещенная комбинированная обработка (СКО) с УЗК на указанных выше режимах обеспечивает устойчивый процесс обработки и упрочнение металла, сплошное равномерное покрытие пленкой толщиной до 1 мкм (на микровыступах) неровностей обработанной поверхности с шероховатостью после обработки резцом  $R_z \sim 12-20$  мкм. При этом в зависимости от режима обработки и исходной шероховатости на поверхности возможно образование регулярного микрорельефа с высотой неровностей  $R=1-2$  мкм (ГОСТ 24773), радиусы скругления вершин и впадин неровностей увеличиваются до 250–500 мкм, по сравнению с 30–60 мкм для поверхностей, обработанных резцом. Одновременно с улучшением микрорельефа происходит упрочнение (наклеп) поверхностного слоя деталей на величину до 25%, возникает новая субструктура верхнего слоя металла с антифрикционными элементами (медь, олово и др.) из РАС, изменяется и структура нижерасположенного слоя металла заготовки с образованием остаточных напряжений сжатия величиной до 700 МПа. Данные изменения приводят к значительному уменьшению контактного давления между деталями в эксплуатации и коэффициентов трения до величины 0,045, что существенно снижает изнашивание рабочей поверхности цилиндров и вероятность появления задиров и схватывания.

Для подтверждения указанного проводились сравнительные испытания подвергнутых вибродорнованию втулок (стали 40Х, 30ХГСА) способом СКО с УЗК и без УЗК – традиционным способом. Образцы – втулки испытывались в паре трения с валом (сталь ШХ15) на установках трения типа СМЦ-2, 77МТ в двух вариантах: на изнашивание при  $P_{уд}=6$  МПа,  $v=800$  мин<sup>-1</sup>, время испытаний 12ч и задир при ступенчатом повышении нагрузки на 4 МПа через каждый час испытаний. Для моделирования сопряжения вал-втулка была использована схема «вал-колодка», в качестве колодки использовали сегмент втулки, вырезанный электроискровым способом. Испытания проводились на 5–7 парах трения. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний 5–7 образцов

Показатели оценки качества обработанной поверхности	Обработка дорном без подачи РАС и УЗК	Обработка дорном с подачей РАС и УЗК
Средний износ поверхности втулки, мг	134,6	36,5
Интенсивность износа, $J_h \cdot 10^5$ мг/м	5,8–6,8	1,58–1,65
Коэффициент трения	0,12–0,14	0,04–0,05
Задиростойкость, сек	51–54	168–215
Квалитет точности	9–8	7–6

Таким образом выше указанные результаты исследования и данные таблицы свидетельствуют, что новый совмещенный способ обработки обеспечивает более высокие показатели качества поверхностного слоя и точности обработки, износо- и задиростойкости и др. по сравнению с обработкой дорном в обычных традиционных условиях.