



Рисунок 3 - Система ЧПУ трехкоординатного манипулятора

Уплотнение, полученное с помощью робототехнического комплекса, обеспечивает степень герметичности и защиты IP 54-67, а также обладает целым рядом преимуществ: является бесшовным, что исключает стыки и обрезки, характерные для других типов уплотнений, гарантированно препятствует попаданию влаги и пыли внутрь прибора; позволяет добиться лучших звуко-, шумоизоляции и вибропоглощения.

Данное оборудование является собственной разработкой, проектируется и изготавливается в соответствии с индивидуальной спецификой

каждого производства. Благодаря этому все вопросы, связанные с его функционированием, можно решать без обращения в сторонние сервисные центры. Возможна поставка любых необходимых комплектующих и расходных материалов.

1. Ксенофонтов, М.А. Пенополиуретаны. Структура и свойства [Текст] / М.А. Ксенофонтов // Вестник БГУ. - 2011. - Серия 1. - № 3. - С. 48-52.
2. Пат. № 10305 РБ, МПК В 29С 67/20. Установка заливочная смесительно-дозировочная / М.А. Ксенофонтов и др. // Заявка № 20131071 13.12.2013, опублик. 30.10.2014, электр. ресурс Бюл. № 5, стр. 132-134, дата доступа 12.03.2015 г.
3. Пат. № 9922 РБ, МПК В 29В 7/12, В 29В 7/40. Смесительное устройство / М.А. Ксенофонтов М.А. и др. // Заявка № 20130524 17.06.2013; опублик. 28.02.2014, электр. ресурс Бюл. № 1, стр. 163-164, дата доступа 12.03.2015 г.

УДК 621.7.620.186

ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ И НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕМ ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Кузнецова Т.А.^{1,2}, Зубарь Т.И.¹, Чижик С.А.^{1,2}, Мясоедов Е.Н.², Лапицкая В.А.¹, Мишак А.³, Лабуда В.³

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Морская академия

Гдыня, Польша

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является эффективным и распространенным методом улучшения свойств деталей машин [1]. Роликовое ППД основано на микропластическом формировании поверхностных слоев осей, валов и подшипников с помощью роликовых накаток [2 - 4]. Обычно внимание исследователей направлено на степень упрочнения после обработки и шероховатость поверхности. В данной работе представлены результаты исследования пластического деформирования поверхности с учетом оценки свойств микрометровых слоев.

Целью данной работы является экспериментальное исследование морфологии и свойств поверхностных слоев валов после роликового ППД высокоразрешающими методами – атомно-силовой микроскопией (АСМ) и наноиндентированием.

В качестве образцов для исследования выступали валы из нержавеющей стали, поверх-

ность которых подвергалась роликовому ППД от одного до четырех раз. Описание технологического процесса пластического деформирования валов приведено в [5 - 6].

Исследование шероховатости пластически деформированных поверхностей было проведено с использованием контактного профилометра Mitutoyo (Япония). Измерения микротвердости были выполнены на поперечном сечении вала на глубинах до 300 мкм от поверхности двумя методами: с использованием микротвердомера ПМТ-3 (Россия) и НИ Nysitron T1750L Ubi (США). Морфология поверхностей была исследована с помощью АСМ NT - 206 (Беларусь) в контактном режиме с использованием стандартного кремниевого кантилевера с радиусом острия 10 нм и коэффициентом жесткости 0,08 Н/м.

Результаты исследований показали, что средняя шероховатость поверхности после одного прохода составила 128 нм, после второго умень-

шилась до 98 нм, после третьего увеличилась до 216 нм, а четвертый проход ППД снова уменьшает значение средней шероховатости до 130 нм. Немонотонность изменения величины шероховатости от количества проходов ППД можно объяснить формированием пластически измененного слоя. Он образуется во время первого прохода из деформированных слоев стали и машинного масла. Второй проход сглаживает микрошероховатости и уменьшает толщину измененного слоя. Третий проход включает в процесс пластического деформирования новые объемы материала, а четвертый разглаживает их. Это подтверждается тем, что выступы и впадины на профилях более симметричны и однородны после второго и четвертого прохода.

Значения микротвердости растут вместе с количеством проходов ППД. У поверхности вала она выше, чем на глубине. Наибольшее ее значение (около 7,5 ГПа) зафиксировано вблизи поверхности у вала после четырех проходов пластического деформирования. На глубине 300 мкм у валов после трех и четырех проходов микротвердость одинакова (~ 6,1 ГПа).

НИ позволяет по поперечному шлифу детали измерять свойства тонкого пластически деформированного слоя на глубине нескольких микрометров от поверхности и контролировать изменения вглубь детали до постоянных значений. Результаты исследований показали, что четырехпроходное ППД обеспечивают самый высокий уровень микротвердости, как на поверхности, так и в глубине материала. У вала после четырех проходов под поверхностным слоем толщиной 20 мкм наблюдается резкий скачок модуля Юнга до 210 ГПа от 180 ГПа на поверхности и 180 ГПа в глубине материала. Тогда как после одного прохода на глубине 20 мкм модуль Юнга составляет 140 ГПа, а в глубине материала менее 160 ГПа.

Результаты исследования деформированной поверхности валов показали присутствие пластически измененного слоя. Слои, образованные после трех и четырех проходов, более толстые по сравнению со слоями после одного и двух проходов роликового ППД. Сформированный на поверхности слой может работать в качестве твердой смазки в процессе трения. Таким образом, вместе с упрочнением поверхности улучшаются и трибологические свойства. Метод АСМ позволил получить более полную картину микроструктуры. Поверхность вала после одного прохода имеет области, где структура не ориентирована в соответствии с направлением перемещения инструмента. После двух проходов ППД структура становится ориентированной и появляются микрочастицы с диаметром от 100 нм до 1 мкм. Поверхность после трех проходов характеризуется наличием мягкого бесструктур-

ного слоя. После четырех проходов поверхность имеет более выраженную структуру, включающую два упорядоченных подслоя (рисунок 1). На изображении в режиме латеральных сил нижний слой состоит из округлых частиц диаметром 100 – 500 нм. Предполагается, что частицы – это пластически измененные зерна стали в матрице более пластичного машинного масла после полимеризации. В верхнем слое частицы практически отсутствуют, преобладает полимеризованное масло. Структура показывает, что верхний слой под нагрузкой может изменяться и служить в качестве твердой смазки. Результаты измерения шероховатости R_a методом АСМ на поле 20 x 20 мкм представлены в таблице 1.

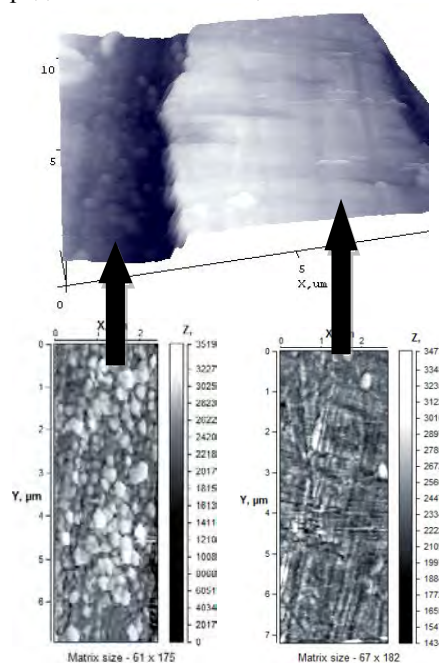


Рисунок 1 – АСМ-морфология поверхности после четырех проходов ППД

Измерение адгезионных сил с помощью АСМ показывает, что поверхности после трех и четырех проходов ППД имеют низкие значения около 5,2 и 7,3 мкН (таблица 1). Это означает, что эти слои обеспечивают низкий коэффициент трения по сравнению с первым и вторым проходами. Высокие силы адгезии между деталями, как правило, увеличивают коэффициент трения

Заключение.

Результаты АСМ и НИ – исследований поверхности валов после роликового ППД показали наличие третьего тела на поверхности – мягкого измененного слоя, образованного из пластически деформированной стали и машинного масла под действием нагрузки и температуры. Этот слой может работать в качестве твердой смазки при трении. Таким образом, наличие мягкого слоя с модулем Юнга 4,6 ГПа на стальной поверхности, упрочненной до значений модуля упругости 210 ГПа и микротвердости 7

ГПа, позволяет рекомендовать четырехпроходное роликовое ППД для улучшения свойств деталей трибологического назначения.

Таблица 1 – Свойства поверхности вала после ППД, полученные методом АСМ.

Кол-во проходов	R _a (АСМ), nm	Модуль упругости на глубине 20 нм (АСМ), ГПа	Сила адгезии между поверхностью и АСМ-зондом, мкН
1	26	-	9.0
2	31	4.1	8.8
3	66	4.3	5.2
4	79	4.6	7.3

1. Chomiene, V., Valiorgue, F., Rech, J., Verdu, C., Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 13, 2016, pp. 90 – 96.

- Hua, W., Man, B., Liu, B., Contact force studies of a burnishing slider, Tribology International, 41, 2008, pp.60 – 66.
- Ahmed, R., Sutcliffe, M.P.F. Indentation of surface features on cold-rolled stainless steel strip, Wear, Vol. 244, 2000, pp. 60 – 70.
- Balland, P., Tabourot, L., Degre, F., Moreau, V., Mechanics of the burnishing process, Precision Engineering, Vol.37, 2013, pp. 129 – 134.
- Labuda, W., Charchalis, A., The influence of finish tooling on friction properties of steel applied to sea water pump shafts, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 21 No. 2, 2014, pp. 185 – 192.
- Labuda, W., Charchalis, A., The analysis of finish tooling influence on wear intensity of marine pump shaft, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 1, 2013, pp. 163 – 170.

УДК 621.317

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО МЕТАМАТЕРИАЛА С ВАРАКТОРНЫМИ ДИОДАМИ

Курило В.С., Рудницкий А.С.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Метаматериальные поглотители (metamaterial absorber - ММА) со своеобразными электромагнитными свойствами вызвали большой интерес в течение последнего десятилетия [1]. Элементарные единицы метаматериала чаще всего располагаются периодически, имеют размер много меньше длины волны и удовлетворяют модели Лоренца–Друде, так же как нормальный материал [2]. Взаимосвязь между свойствами этих единиц и макроскопическими свойствами метаматериала устанавливается на основании теории эффективного усреднения [3].

Рабочая частота традиционных метаматериалов фиксирована и не может изменяться после изготовления. Поэтому все больше внимание уделяется разработке перестраиваемых ММА. В работе [4] исследована поверхность с высоким импедансом и с расположенными на ней резисторами и варакторными диодами. В статье [5] продемонстрирован переключаемый отражатель-поглотитель с диодами в структурных ячейках метаматериала. Реализуются два возможных состояния диодов: «Включен», «Выключен» и возможность переключения состояний. При их оптимизации могут быть полезными исследования электромагнитных свойств ячейки метаматериала в зависимости от параметров, которые можно изменять электрическим или другим способом.

В данной работе представлены результаты исследования метаматериалов из периодически расположенных на подложке ячеек, образованных микрополосковыми элементами, включенными между ними конденсаторами и резистивными пленками.

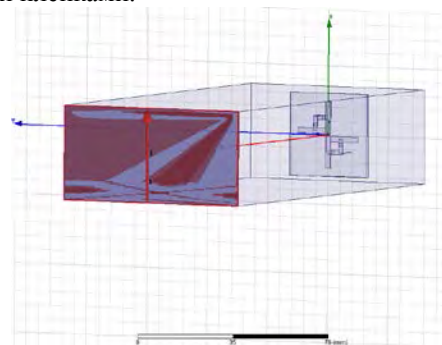


Рисунок 1. Вычислительная модель с ячейкой метаматериала

Предположим, что требуется обеспечить перестройку частоты минимального коэффициента отражения электромагнитной волны от метаматериального покрытия металлической поверхности при ограничении уровня отражения вне резонансной частоты. Этому условию частично удовлетворяет модель, показанная на рисунке 1. Она исследована методом компьютерного моде-