

НАПРАВЛЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© 2016 В.Г. Шуваев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

В статье рассматриваются вопросы эффективного формирования микрорельефа поверхностей деталей с помощью воздействия ультразвуковых колебаний, которые одновременно способствуют активации фторактивных смазочных композиций. Приводится разработанное устройство для повышения эффективности и расширения возможностей ультразвуковой обработки при формировании оптимального микрорельефа поверхностей и активации фторактивной смазочной композиции, основанное на применении трёхмерного вибрационного поля с отдельным управлением колебательными движениями по каждой координате.

Ключевые слова: поверхность; микрорельеф; ультразвук; фторполимеры; активация.

Надежность и долговечность работы машин и механизмов в значительной степени определяется эксплуатационными свойствами деталей и соединений, которые во многом зависят от качества их рабочих поверхностей, причем состояние рабочей поверхности детали оказывает влияние на такие ее эксплуатационные свойства, как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость и др.[1].

Известно, что качество поверхностного слоя детали представляет собой совокупность всех его служебных свойств. Поверхностный слой отличается по своим характеристикам от свойств материала сердцевины детали. С помощью соответствующего подбора режимов механической обработки, особенно финишных операций, можно влиять на свойства деталей, причем это влияние носит комплексный характер, поскольку качество поверхностного слоя определяется его микрогеометрией, структурными превращениями, степенью наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений и другими показателями.

Повысить сопротивление деталей разрушению при разнообразных видах и условиях эксплуатационного нагружения возможно методами объемного или поверхностного упрочнения. Однако, принимая во внимание, что большинство деталей работает в условиях эксплуатационного нагружения, воспринимаемого главным образом их поверхностным слоем, методы поверхностного упрочнения получили широкое практическое применение.

Разработано значительное количество методов поверхностного упрочнения, в основе которых лежит или нанесение специальных покрытий или изменяющих состояние поверхности

Вячеслав Георгиевич Шуваев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».

E-mail: ask@samgtu.ru

деталей, у которых разрушение начинается с поверхностного слоя.

В процессе модифицирования поверхностного слоя деталей происходят физико-химические изменения, повышается сопротивление разрушению металла, причем модифицирование возможно осуществлять различными методами, связанными с деформационным упрочнением, диффузионным насыщением легирующими элементами, поверхностной термообработкой. Выбор эффективного метода упрочнения зависит от назначения детали и условий и режимов эксплуатации, в связи с чем часто применяют комбинированные методы упрочнения, основанные на использовании воздействий, усиливающих требуемые эксплуатационные свойства деталей.

Выбор эффективных методов поверхностного упрочнения определяется с одной стороны, условиями и видом эксплуатационной нагрузки, а с другой стороны, зависит от экономических и технологических затрат, связанных с применением конкретных методов упрочнения.

Одним из наиболее экономичных и эффективных видов механического воздействия на рабочие поверхности деталей является поверхностное пластическое деформирование (ППД), которое дает возможность полнее реализовать потенциальные свойства конструкционных материалов в реальных деталях, особенно в деталях сложной формы, с концентраторами напряжений.

При ППД вследствие пластической деформации исходной поверхности формируется шероховатость с малой высотой и увеличенными радиусами вершин и впадин неровностей, а также с большими величинами относительной опорной длины профиля поверхности, что в сочетании с упрочнением металла приводит к увеличению контактной жесткости стыков, снижению изнашивания пар трения. Применение ППД дает возможность при сравнительно небольших про-

изводственных затратах существенно повысить сопротивление усталости, износостойкость, контактную жесткость деталей и тем самым повысить ресурс работы машин и механизмов. Выбор оптимального метода обработки и рациональной конструкции инструмента для ППД определяется большим числом факторов: размерами и формой обрабатываемых деталей, их прочностью и жесткостью, требованиями, предъявляемыми к точности и качеству поверхности, характером производства.

Наибольший эффект дает обработка ППД поверхностей деталей с разнообразными концентраторами напряжений, причем увеличение предела выносливости тем выше, чем больше концентрация напряжений. Одним из перспективных направлений упрочняющей обработки посредством ППД, обеспечивающего получение оптимальных геометрических параметров качества поверхности, является создание на обработанных поверхностях частично или полностью регулярного микрорельефа. Регуляризация микрорельефа на поверхностях деталей и приборов способствует повышению надежности и долговечности деталей, сокращению длительности приработки, повышению эффективности теплопередач, замене дорогостоящих материалов конструкционными, сокращению трудоемкости изготовления деталей, повышению точности и долговечности.

Нормирование поверхности с регулярным микрорельефом производится исходя из функционального назначения детали, причем регулярный микрорельеф включает в себя как полностью регулярные микрорельефы, так и частично регулярные микрорельефы. Целевое назначение регулярного или частично регулярного микрорельефа заключаются как в получении оптимального микрорельефа для различных условий эксплуатации детали, так и в упрочнении материала поверхности детали, обеспечении декоративной обработки поверхности, создании оптимальных масляных карманов и т.д.

В последнее время находит технологическое применение ультразвук, что определяется его высокой адаптивностью к существующим технологиям, гибкостью и эффективностью концентрации и фокусировки, возможностью применения ультразвука в широком диапазоне интенсивностей и частот. Все это позволяет применять УЗ технологии как в качестве основных, так и в качестве вспомогательных, позволяющих резко интенсифицировать технологический процесс и существенно повысить его качественные характеристики. Применение ультразвуковых колебаний является средством активного воздействия на структуру твердых тел и процессы их контактного взаимодействия, в том числе и на формирование микрорельефа.

Как известно [2], через короткое время приработки в любой паре трения наблюдается весьма

существенное отличие свойств материала поверхностного слоя глубиной порядка нескольких микрометров от состояния материала после технологической обработки, причем самые существенные изменения происходят вследствие силового и температурного воздействия трения, что приводит к деформации (наклепу), текстурированию материала, изменению его элементного состава, связанного с переносом вещества из контртела и внешней среды, а также химической модификации (преимущественно образованию оксидов), изменению плотности, теплопроводности и др. характеристик, что ведет к существенному отличию значений энергии активации.

При упрочнении деталей с помощью защитных покрытий на поверхность наносятся материалы, которые наиболее полно соответствуют условиям и режимам эксплуатации, связанным с температурными и вибрационными воздействиями, повышенным износом, коррозией, химическими воздействиями и т.п. Химическая модификация происходит в результате приработки поверхности образца в среде смазочного материала. В процессе трения, под действием высоких температур и давлений в зоне фактического пятна касания происходит деструкция молекул смазочного материала с образованием активных центров (свободных радикалов) и их химическое взаимодействие с металлом. Одновременно изменяется химический состав и свойства смазочного материала за счет взаимодействия с кислородом, другими компонентами среды и материалом поверхности твердых тел. При термомеханической деструкции молекул смазочного материала, нанесенного на поверхность металлического образца, и химическом взаимодействии свободных радикалов и атомов металла со смазкой образуются новые связи между разнородными атомами, что приводит к повышению энергии решетки металла. При этом из-за малости температуры термодеструкции смазочных материалов по отношению к температуре фазовых переходов в металле, в процессе модификации сохраняется исходная кристаллическая структура в поверхностном слое образца, но меняется его химический состав.

При введении ультразвука растет энергия тела и повышается адгезионная способность металла к смазке, кроме того, ультразвуковые колебания способствуют развитию дефектов структуры (микротрещин, микропор), обеспечивают активное воздействие адсорбционных слоев. При пульсации поверхностных микрорельефов, заполненных смазкой, периодически происходит ее вытеснение и разрыв мостиков схватывания, происходит пластифицирование поверхностного слоя обрабатываемого металла вследствие расклинивающего действия смазки и адсорбционного эффекта понижения твердости. Ультразвук способствует ускорению хими-

ческих реакций на контактной поверхности и образованию защитных пленок, наблюдается и чисто механическое воздействие ультразвука, что сказывается в распылении жидкости и ее более равномерном распределении по контактной поверхности. Из-за различия амплитуд колебаний инструмента и поверхности детали происходит пульсация зазора, которая способствует засасыванию жидкости, аналогичную роль играет сильно разветвленная сеть микротрещин, изменяющая свои размеры под действием колебаний [3].

В последнее время находят применение фторактивные смазочные композиции, например «Эпилам» производства Санкт-Петербургской компании «Автостанкопром», формирующие многофункциональные защитные нанопленки, которые придают твердой поверхности антифрикционные, антиоксидантные, антикоррозионные, гидрофобные и антиадгезионные свойства. Практическое использование таких композиций требует решения проблем активации и управления параметрами хемосорбции с обрабатываемой поверхностью. При активации полимерной композиции фторсодержащие макромолекулы приобретают свойства, совершенно отличные от свойств тех составных единиц, из которых они построены [4].

Одним из эффективных способов активации фторполимеров является воздействие ультразвуком. Использование ультразвуковых колебаний ускоряет диффузионные и адгезионные процессы при нанесении покрытий. Ультразвук проникает в слой жидкой фазы покрытия, изменяя его структуру, позволяет активировать пространственно-периодические структуры композиций, в основе которых находятся атомы или пластически деформированные зерна. Воздействие ультразвуковых колебаний обеспечивает устойчивую геометрию наноструктур. При этом из-за малости температуры термодеструкции смазочных материалов по отношению к температуре фазовых переходов в металле, в процессе модификации сохраняется исходная кристаллическая структура в поверхностном слое образца, но меняется его химический состав.

С целью повышения эффективности и расширения возможностей ультразвуковой обработки для формирования требуемого микрорельефа

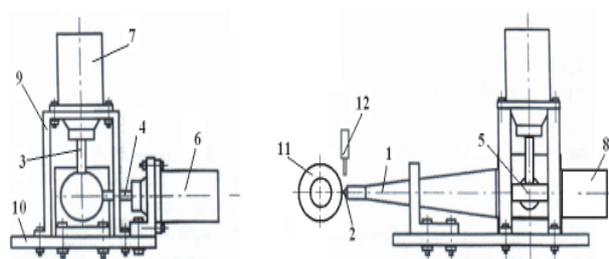


Рис. 1. Ультразвуковое устройство для формирования микрорельефа поверхности и активации фторполимерного покрытия

поверхностей и активации фторактивной смазочной композиции предложено применение трёхмерного вибрационного поля с отдельным управлением колебательными движениями по каждой координате [3].

Известно, что если механическая система участвует в колебаниях, которые происходят в двух перпендикулярных направлениях, а именно вдоль осей x и y прямоугольной системы координат:

$$x = X_m \sin(\omega_x t + \varphi_{0x}),$$

$$y = Y_m \sin(\omega_y t + \varphi_{0y}),$$

то результирующее отклонение в момент времени t определяется как их векторная сумма [5]. В нашем случае практический интерес представляет изучение траектории движения инструмента при сложении колебаний, описываемых вышеприведенными уравнениями. Если соединить результирующие отклонения в различные моменты времени линией, то получается траектория результирующих колебаний в плоскости x, y , а возникающие сложные кривые называют фигурами Лиссажу. Форма фигуры Лиссажу зависит от отношения частот и разности начальных фаз, причем форма остается неизменной, если отношение частот представляет собой рациональное число. Формируемые траектории дополнительно накладываются на основное колебательное воздействие вдоль оси z , что приводит к созданию сложного колебательного воздействия, позволяющего полнее использовать возможности ультразвука.

На рис. 1 изображена структурная схема запатентованного ультразвукового устройства для формирования микрорельефа поверхности и одновременной активации полимерной композиции.

Устройство содержит концентратор механических колебаний 1 на выходном конце которого размещается деформирующий элемент в виде шарика 2. С входным концом концентратора соединены волноводы 3, 4, 5, которые связаны с магнитострикционными преобразователями 6, 7, 8, служащими для возбуждения ультразвуковых механических колебаний, формируемых из электрических гармонических сигналов. Магнитострикционные преобразователи крепятся на стойках 9, которые в свою очередь закреплены на плите 10.

Ультразвуковые продольные колебания, создаваемые магнитострикционным преобразователем 8 через волновод 5 и концентратор механических колебаний передаются деформирующему элементу, который получает продольные колебания с частотой 18000-23000 Гц и амплитудой до 10-20 мкм. Одновременно концентраторы механических колебаний 6 и 7 через волноводы 3 и 4 передают поперечные колебания в двух перпендикулярных плоскостях на концентратор 1.

Устройство может быть размещено на суппорте токарного станка (на чертеже не показан) и закрепляется с помощью винтов через отверстия в плите. Обрабатываемая деталь 11 устанавливается в патроне или центрах. Усилие прижима концентратора механических колебаний с деформирующим элементом к обрабатываемой поверхности детали создается за счет поперечного перемещения суппорта станка. Подача смазочной композиции на обрабатываемую поверхность детали 11 из резервуара 12 осуществляется непрерывно в течение всего цикла обработки поверхности детали. В качестве источников ультразвуковых колебаний могут быть использованы ультразвуковые генераторы типа УЗГ 3-4, к которым подключаются магнитострикционные преобразователи.

С целью упрощения конструкции и снижении стоимости устройства для ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей предлагается один из волноводов выполнить в виде пружины в форме спирали Архимеда [6].

Траектория возбуждаемых колебаний имеет сложный характер, что определяется особенностями взаимодействия магнитострикционного преобразователя (привода колебательного движения) и волновода в виде пружины в форме спирали Архимеда. Спираль Архимеда представляет плоскую кривую линию, многократно обходящую одну из точек на плоскости, называемую полюсом спирали. Геометрическим свойством, характеризующим спираль Архимеда, является постоянство расстояний между витками. Перемещение по спирали Архимеда будет результатом двух равномерных движений: приближения к полюсу и вращения вокруг полюса. Так как магнитострикционный преобразователь установлен в плоскости спиральной пружины, то в ней возбуждается, во-первых, упругая волна продольных колебаний, формирующая амплитуду колебаний концентратора в направлении, совпадающим с касательной в точке крепления концентратора к спиральной пружине (по оси ординат). Во-вторых, в силу спирального выполнения пружины в ней формируется изгибная волна колебаний с пучностью в месте крепления концентратора к спиральной пружине. Изгибная волна вызывает колебания концентратора 1 в направлении, перпендикулярном обеспечиваемому продольной волной (по оси абсцисс). Так как оба типа колебаний имеют одну частоту, а именно частоту колебательной системы, образованной концентратором, спиральной пружинкой и магнитострикционным преобразователем, то сложение амплитуд этих колебаний с взаимно перпендикулярными векторами вызывает в общем случае эллипсную траекторию движения концентратора. Эллипсность траектории движения обусловлена

различием амплитуд колебаний (величина амплитуды изгибных колебаний в данном случае будет больше амплитуды колебаний, формируемых продольной волной). Так как скорость распространения продольной волны в металлах почти в два раза выше скорости распространения изгибной волны, то возникающий фазовый сдвиг (набег) приводит к вращению эллипсной траектории движения концентратора 1 в плоскости, параллельной к поверхности обрабатываемой детали. Управлять формой и размерами эллипсной траектории возможно путём изменения амплитуды и частоты колебаний, создаваемых магнитострикционным преобразователем.

В случае применения предлагаемой технологии для модификации поверхностей маложестких деталей целесообразно вместо магнитострикционных преобразователей механических колебаний применять пьезокерамические преобразователи, имеющие меньшие габариты и не требующие при работе водяного охлаждения. В проводимых экспериментах ультразвуковые механические колебания возбуждались шестью пьезокерамическими шайбами осевой поляризации типа ЦТС-19 толщиной 4 мм, причем механически шайбы были соединены последовательно, а электрически – параллельно. Концентратор, усиливающий амплитуду механических колебаний, был выполнен из титанового сплава марки ВТ16.

Таким образом, формирование объемных трёхмерных ультразвуковых упругих колебательных воздействий существенно расширяет технологические возможности ультразвуковой обработки поверхностей, позволяет использовать большее число управляющих воздействий на поверхностный слой деталей, повысить гибкость ППД, формировать требуемый микрорельеф поверхностей и проводить активацию фторактивной смазочной композиции.

Выявлено, что введение в зону деформации ультразвуковых колебаний привело к увеличению износостойкости поверхностного слоя в 1,5 - 2 раза по сравнению с традиционными способами ППД, площадь относительной опорной поверхности увеличивается на 35 – 50 % при глубине наклепанного слоя до 1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ [под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина]. М.: Машиностроение, Нью-Йорк: Америкен пресс, 1993. 454 с.
3. Шуваев В.Г., Папшев В.А., Шуваев И.В. Инструмент для формирования параметров качества поверхностного слоя деталей при ультразвуковой финишной обработке // СТИН. 2012. № 10. С. 37-40.

4. Вохидов А., Мисюряев А. Многофункциональные фторактивные нанопленки: актуальные проблемы // *Наноиндустрия*. 2014. № 5(51), С. 40-44.
5. Патент РФ № 2393076. Способ ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей / *В.Г. Шуваев, В.А. Папиев, И.В. Шуваев* // 21.06.2010. Бюл. № 18.
6. Патент РФ на полезную модель № 143794. Устройство для ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей вращающихся деталей / *В.Г. Шуваев, М.С. Горобец* // 27.07.2014. Бюл. № 21.

**DIRECTED SURFACE MODIFICATION OF THE ITEM
BY USING ULTRASOUND OSCILLATION ACTION**

© 2016 V.G. Shuvaev

Samara State Technical University

The article deals with the efficient formation of surface microrelief parts using ultrasonic vibration effects that simultaneously promote activation foraktivnyh lubricant compositions. The device is designed to improve the efficiency and extend the capabilities of ultrasonic treatment during the formation of the optimal microtopography of surfaces and the activation foractive lubricating compositions based on the use of three-dimensional vibration field with separate control of oscillatory motions for each coordinate.
Keywords: surface; microrelief; ultrasound; fluoropolymers; activation.