

УДК 621.9.048.6

В. В. КЛУБОВИЧ¹, В. А. ТОМИЛО², В. И. МАРУСИЧ¹, Е. В. ХРУЩЁВ¹**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ПОРОШКОВ**¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,²Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,

e-mail: nil_p@bntu.by

Эксплуатационные качества упругих элементов изделий автомобильной и сельскохозяйственной техники во многом зависят от состояния поверхностного слоя. Так, прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, долговечность и надежность определяются состоянием поверхностного слоя изделия, с которого обычно начинается разрушение материала. Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием с наложением ультразвуковых колебаний большой мощности позволяет в поверхностных слоях изделий создать сжимающие остаточные напряжения и микро- и наноструктурное состояние. Предложены способы ультразвуковой обработки упругих пластин и внутренних поверхностей тел вращения, а также способы и устройства для диспергирования порошков с применением мощного ультразвука, разработанные авторами.

Ключевые слова: ультразвук, диспергирование, механоактивация, поверхностно-пластическое деформирование, волновод-концентратор.

V. V. KLUBOVICH¹, V. A. TAMILA², V. I. MARUSICH¹, E. V. KHRUSHCHOV¹**ULTRASONIC PROCESSING OF METAL WORKS AND POWDERS**¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,²Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,

e-mail: nil_p@bntu.by

Performance of elastic elements of automobile manufacturing and agricultural machinery is dependent on the state of the surface layer. Thus, strength, wear resistance, corrosion resistance, durability and reliability are determined by the state of surface layer of a product, which usually starts the destruction of material. Strengthening processing by superficial plastic deformation superimposed ultrasonic vibrations of high power allows the surface layers of products to create compressive residual stresses and micro- and nanostructured state. A method of ultrasonic treatment of the elastic plate and the inner surfaces of solids of revolution, developed by the authors, as well as ways and means for dispersing powders using powerful ultrasound are proposed.

Keywords: ultrasonic, dispersion, mechanoactivation, surface plastic deformation, sonotrode.

Введение. Прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, долговечность и надежность определяются состоянием поверхностного слоя изделия, который в первую очередь подвергается разрушению. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным деформированием с наложением ультразвуковых колебаний позволяет уменьшить высоту микронеровностей и создает в поверхностных слоях благоприятную эпюру остаточных сжимающих напряжений. Для подведения ультразвуковых колебаний к обрабатываемым изделиям используют ультразвуковые установки, состоящие из генератора электрических колебаний, электроакустического преобразователя, ультразвуковой колебательной системы, привода для осуществления технологического процесса, конструктивно соединенного с колебательной системой. При этом ультразвуковая колебательная система, предназначенная для осуществления технологического процесса, должна удовлетворять следующим акустическим и конструктивным требованиям: обеспечение максимального отбора акустической энергии от электроакустического преобразователя и передача ее в зону обработки; минимальные потери энергии в звеньях колебательной системы; устойчивая работа при изменении параметров нагрузки; стабильные показатели при длительной эксплуатации [1].

Анализ ультразвукового воздействия при поверхностно-пластическом деформировании. При проведении исследований применяли колебательную систему, в которой электроакустический преобразователь, прикрепленный к концентратору, свободный торец которого в процессе колебаний периодически соударялся с обрабатываемым изделием, а также колебательную систему, в которой обработка производилась инструментом, закрепленным непосредственно на волноводе ультразвукового излучателя (рис. 1).

Проведенные исследования ультразвуковой ударной обработки поверхности по схеме рис. 1, а показали, что упрочнение поверхности образцов наступает при амплитудах колебаний полусферы излучателя более 5 мкм, причем эффективность ультразвукового поверхностного пластического деформирования связана с импульсным характером ультразвуковых напряжений.

Рассмотрим способ обработки, при котором ультразвуковой инструмент прижимается с постоянной силой F_c к обрабатываемой поверхности изделия (пластины). Эксперименты показали, что при включении ультразвуковых колебаний с амплитудой, равной 10 мкм и выше, на деформирующем элементе сила прижима имеет вид периодически повторяющихся импульсов (рис. 2), а в интервале между импульсами ее величина равна нулю и пиковое значение существенно выше усилия постоянного прижима, равного 45 Н.

В качестве величины, характеризующей пластическую деформацию материала, выбрана площадь поверхности отпечатка S . В процессе экспериментов варьировались значения основных параметров: амплитуды колебательных смещений инструмента A_m и постоянной силы F_c . Одновременно с измерением площади отпечатка регистрировали пиковое значение механических напряжений. При измерении диаметра отпечатка установлено, что в отсутствие ультразвуковых колебаний площадь поверхности отпечатка соответствовала расчетному значению при заданной силе. С увеличением амплитуды она возрастала. Такое изменение связано с повышением в определенные моменты мгновенного значения действующей силы по сравнению с ее стационарной величиной. При сопоставлении площади отпечатка с величиной пиковых напряжений установлено, что связь между ними соответствует линейному корреляционному уравнению.

Как показывают проведенные экспериментальные исследования, степень пластической деформации при ударном воздействии ультразвукового инструмента определяется величиной пиковых напряжений, зависящей от амплитуды колебательных смещений A_m , постоянной силы F_c и характеристик обрабатываемого материала.

Усредненная за период колебаний сила контактного взаимодействия следующая:

$$F_c = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt, \quad (1)$$

где T – период ультразвуковых колебаний.

Характер движения деформирующего элемента и действующих сил представлен на рис. 3.

Положение деформирующего элемента можно описать выражением

$$A(t) = A_m \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (2)$$

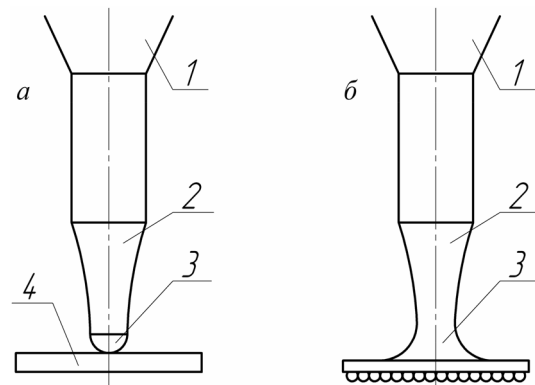


Рис. 1. Схемы устройств для поверхностного ультразвукового упрочнения пластин – полусфера (а) и ряд деформирующих шариков (б): 1 – акустический преобразователь; 2 – концентратор; 3 – деформирующий элемент; 4 – металлическая пластина

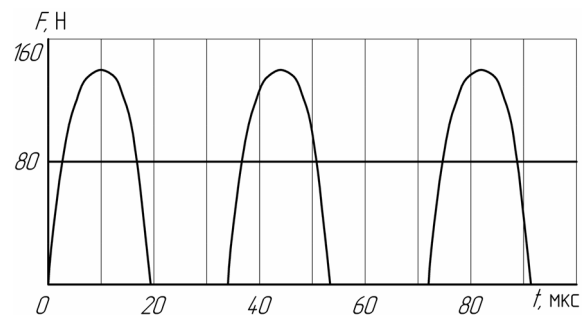


Рис. 2. Зависимость силы прижима от времени

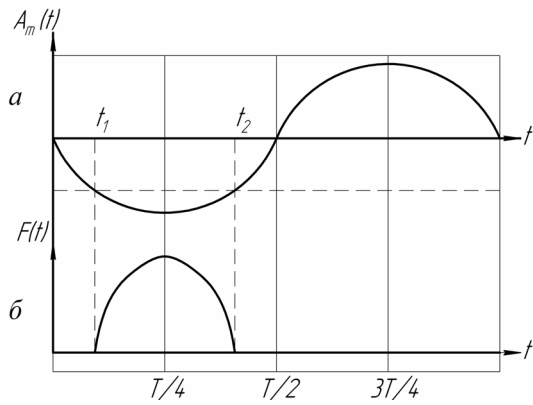


Рис. 3. Характер движения деформирующего элемента (а) и зависимость сил, действующих в процессе его контакта с обрабатываемой поверхностью (б), от времени

Глубина внедрения деформирующего элемента при упругой деформации поверхности будет равна

$$h(t) = A_m \left(\sin \frac{2\pi}{T} t - \sin \frac{2\pi}{T} t_1 \right), \quad (3)$$

а сила взаимодействия элемента с изделием в соответствии с теорией Герца примет вид [2]

$$F(t) = k \sqrt{h^3}. \quad (4)$$

Максимум силы будет соответствовать моменту времени $t = \frac{T}{4}$:

$$F(\max) = k \sqrt{A_m^3} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t_1 \right). \quad (5)$$

При упругом взаимодействии отрыв деформирующего элемента произойдет при $t_2 = \frac{T}{2} - t_1$ и силу взаимодействия можно записать в виде

$$F_c = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{\frac{T}{2} - t_1} k \sqrt{A_m^3} \left(\sin \frac{2\pi}{T} t - \sin \frac{2\pi}{T} t_1 \right) dt. \quad (6)$$

Если исключить из уравнений (5) и (6) параметр t_1 , то можно найти связь между величинами F_{\max} , F_c , A_m . Приближенное соотношение имеет вид

$$F_{\max} = k F_c^p A_m^q, \quad (7)$$

где k – коэффициент, зависящий от упругих свойств обрабатываемого материала; p , q – показатели степени (для данных условий $p = \frac{2}{3}$; $q = \frac{1}{2}$).

Проанализирована связь между степенью пластической деформации, величиной максимальных напряжений и основными параметрами режима (амплитуда колебательных смещений, усилие прижима) и показано, что площадь поверхности отпечатка S зависит от указанных параметров F_c и A_m , причем с их увеличением площадь отпечатка возрастает.

Как показали исследования по упрочнению ряда деталей с применением ультразвуковых колебаний, результаты теоретических разработок хорошо согласуются с данными эксперимента. Упрочнение с применением мощных ультразвуковых колебаний целесообразно использовать для плоских полос (например, рессор). Однако не все типы упругих элементов можно обработать с применением способов поверхностно-пластического деформирования. Иногда в конструкциях подвесок большегрузной техники встречаются рессоры и плоские пружины с резкими перепадами толщин, крепежными элементами, ребрами жесткости и др. Их упрочняют дробеструйной обработкой, однако данный способ имеет ряд недостатков. В таких случаях целесообразно использовать разработанные авторами способы ультразвуковой поверхностной пластической обработки.

Устройство для поверхностного ультразвукового упрочнения пластин. На рис. 4 представлена схема устройства для поверхностного ультразвукового упрочнения пластин с сыпучими деформирующими шариками. Она включает в себя ультразвуковой генератор гармонических сигналов (на рис. 4 не показан), электроакустический преобразователь 1 с концентратором 2, закрепленным на его торце в узловом сечении, выполненном в виде камеры 3, заполненной свободно насыпанными металлическими шариками 4, причем камера 3 узла деформирования снабжена поперечным пазом 5, у основания которого установлены опорные ролики 6. Для перемеще-

ния рессорных пластин 7 по опорным роликам 6 в полости паза 5 устройство снабжено приводным резиновым роликом 8.

Устройство работает следующим образом. Обрабатываемая рессорная пластина 7 укладывается в паз 5 на опорные ролики 6, одновременно прижимается и приводится в движение при помощи приводного резинового ролика 8. После включения ультразвукового генератора в электроакустическом преобразователе 1 возбуждают механические колебания ультразвуковой частоты в диапазоне 20–22 кГц, которые посредством концентратора 2 возбуждают в слое металлических шариков 4 колебания той же частоты и придают им ускорение, необходимое для удара об обрабатываемую поверхность рессорной пластины 7. Размер шариков может колебаться от 0,5 до 1,0 мм. Помимо собственно упрочнения на представленном устройстве можно наносить на поверхность рессоры различные покрытия (цинковые антикоррозионные, антифрикционные, например, диоксид молибдена, графит и др.)

Устройство ультразвуковой ударной обработки внутренней поверхности. Авторами разработано устройство, в котором используют радиальные ультразвуковые колебания [3]. На рис. 5 приведена схема устройства ультразвуковой обработки поверхности вращения. Она включает в себя ультразвуковой генератор 1 гармонических сигналов, магнитострикционный преобразователь 2, волновод-концентратор 3, выполненный в виде преобразователя продольных колебаний в радиальные колебания, на рабочей поверхности которого закреплен деформирующий элемент 4, выполненный в виде закаленных шаров. Устройство работает следующим образом. Трубную заготовку 5 устанавливают в фиксирующем устройстве 6, а затем ей придают вращательное движение вокруг оси профиля внутренней поверхности вращения. После включения ультразвукового генератора 1 в магнитострикционном преобразователе 2 возбуждаются механические колебания ультразвуковой частоты, которые посредством волновода-концентратора 3 передают колебания деформирующему элементу 4. Рабочая часть инструмента вводится во внутреннюю полость заготовки, прижимается с заданной силой к поверхности вращения и совершает продольные возвратно-поступательные перемещения на ширину обрабатываемой поверхности, усилие прижима контролируют датчиком 7. Закаленные шары деформирующего элемента 4 под действием сил трения о внутреннюю поверхность трубной заготовки проворачивают сепаратор, тем самым снижая износ за счет равномерного распределения нагрузки между шарами, что повышает производительность и увеличивает стойкость деформирующего элемента 4.

Проведены эксперименты по обработке внутренней поверхности наружного кольца роликоподшипника из стали ШХ15 с частотой ультразвуковых колебаний 22 кГц, что позволило осуществить равномерную обработку внутренней поверхности подшипника, уменьшить величину шероховатости на 2–4 класса и повысить эксплуатационную долговечность детали на 20%, а также упростить операцию замены изношенных деформирующих элементов, значительно снизить сложность расчета и изготовления волновода-концентратора за счет того, что он является про-

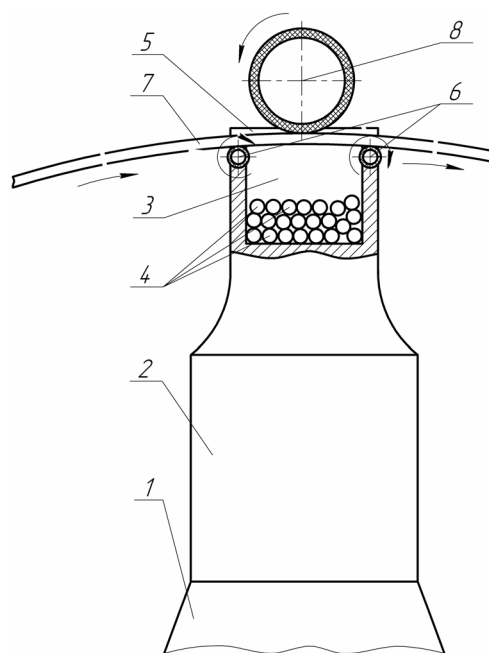


Рис. 4. Схема устройства для поверхностного ультразвукового упрочнения плоских упругих элементов с насыпными деформирующими шариками

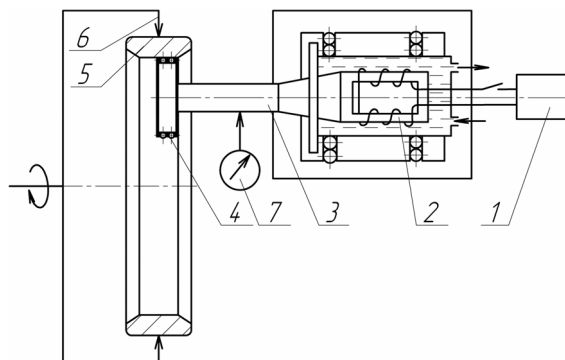


Рис. 5. Схема устройства ультразвуковой ударной обработки внутренней поверхности

стым двухступенчатым цилиндром с резонансными размерами, многократно расширить номенклатуру обрабатываемых трубных заготовок одним инструментом, повысить производительность.

Способы и устройства для обработки порошковых материалов с применением мощных ультразвуковых колебаний. Измельчение (диспергирование) порошков возможно проводить в жидкой среде под избыточным давлением или в металлическом стакане при непосредственном соприкосновении порошка с торцом волновода-концентратора ультразвуковых колебаний. В первом случае порошок обрабатывают в цилиндрической камере с рабочей жидкостью, где создают избыточное давление и возбуждают в ней ультразвуковые колебания посредством контактного воздействия излучающей поверхности источника на цилиндрическую камеру, а напротив излучающей поверхности источника ультразвуковых колебаний с противоположной стороны камеры располагают полуволновую опору-отражатель. В данном случае возбуждение колебаний в рабочей жидкости может осуществляться посредством упругого прижима излучающего торца источника ультразвука и цилиндрической поверхности камеры или когда они установлены с зазором. Величина зазора должна быть меньше, чем половина значения амплитуды колебаний торца излучателя. В противном случае поверхности излучателя и камеры не будут контактировать между собой. При этом возможны режимы взаимодействия двух типов. В режимах первого типа (ударные) сила взаимодействия носит импульсный характер и действует только в течение некоторого интервала периода колебаний излучателя. Режимы второго типа (безударные) отличаются тем, что в течение всего периода колебаний излучатель прижат к поверхности камеры. Очевидно, что при установке излучателя и камеры с зазором режим взаимодействия будет всегда виброударным. В случае, когда излучатель и камера прижаты друг к другу, с увеличением силы поджатия при определенном ее значении возникает безударный режим. Таким образом, изменяя усилие прижима и величину зазора, можно варьировать режимами безударного и ударного взаимодействия. Следовательно, изменится и интенсивность акустического воздействия на рабочую среду.

Предложенные способы позволяют использовать для передачи колебаний от источника ультразвука к цилиндрической камере акустические системы с разными коэффициентами усиления амплитуды колебаний. Это позволяет проводить ультразвуковую обработку как при малых значениях амплитуды ($A \leq 5-8$ мкм), так и при больших значениях ($A \geq 10-35$ мкм). Установлено, что увеличение амплитуды ультразвуковых колебаний от 5 до 35 мкм приводит к значительному сокращению продолжительности процесса обработки.

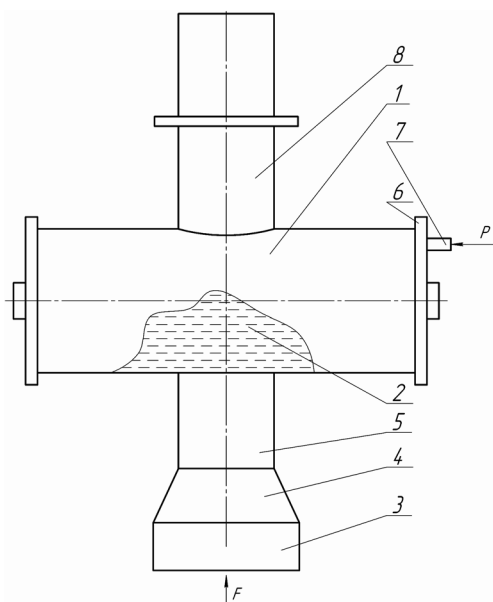


Рис. 6. Схема устройства для обработки (диспергирование) изделий или порошков в жидкости с наложением ультразвука

Использование акустической опоры-отражателя, которую располагают напротив излучающего торца источника колебаний с противоположной стороны цилиндрической камеры, позволяет создать необходимую силу поджатия торца излучателя к поверхности камеры. Опора представляет собой стержень, длина которого равна половине длины волны. Для изоляции акустической опоры от вибраций и повышения добротности место ее крепления в виде буртика находится в узле стоячей волны.

Устройство для диспергирования с наложением ультразвука. Для реализации способа обработки с применением ультразвука в Институте технической акустики НАН Беларуси разработано устройство (рис. 6), которое содержит цилиндрическую камеру 1 с рабочей жидкостью 2, акустическую колебательную систему, состоящую из последовательно соединенных ультразвукового преобразователя 3, трансформатора амплитуды продольных колебаний 4, длинноконтурного волновода 5. С двух сторон камера 1 закрыта крышками 6, на одной из которых установлен штуцер 7 для подвода

воздуха. Напротив излучающего торца волновода 5 с противоположной стороны относительно камеры 1 расположена полуволновая опора-отражатель 8 [4].

Устройство работает следующим образом. В цилиндрическую камеру 1 с рабочей жидкостью 2 засыпают обрабатываемые изделия или порошок. Камеру закрывают крышкой 7 и устанавливают в механизм крепления (на рис. 6 не показан). При обработке с зазором акустическую систему так подводят к камере, чтобы расстояние между излучающей поверхностью длинноконтурного волновода 5 и цилиндрической камерой 1 не превышало половины величины амплитуды колебаний. При обработке с прижимом силой F со стороны волновода 5 камеру 1 поджимают к полуволновой опоре-отражателю 8. Через штуцер 7 в камеру подают сжатый воздух или газ и создают в ней избыточное давление P . Включают питание ультразвукового преобразователя. Для повышения производительности обработки необходимо использовать две камеры. Это позволит за время работы первой камеры произвести выгрузку и загрузку второй, а по окончании процесса обработки произвести их быструю замену.

Ультразвуковое диспергирование порошка окиси магния производили на устройстве в среде четыреххлористого углерода: окись магния 500 г, олеиновая кислота 25 мл, четыреххлористый углерод 5 л. Частота и амплитуда колебаний излучающего торца волновода составляли соответственно 20 кГц и 30 мкм. Избыточное давление в камере $P = 0,65$ МПа, а сила поджатия $F = 7,5$ Н. Продолжительность обработки составляла 25 мин. В исходном состоянии средний размер частиц порошка окиси магния составлял более 20 мкм, а после ультразвуковой обработки – менее 0,2 мкм.

Следует отметить, что предложенный способ ультразвукового диспергирования порошков в жидкости обладает рядом недостатков: сложность технологического процесса, приготовление суспензии, подбор состава рабочей жидкости, применение дополнительного оборудования для обеспечения избыточного давления и герметичность рабочей зоны, что в процессе эксплуатации создает определенные трудности. Кроме того, для выделения сухого механоактивированного порошка из суспензии необходимо проводить сложные и длительные операции сушки и диспергирования слипшегося порошка. Для устранения указанных недостатков авторами разработано устройство для ультразвукового ударного диспергирования порошков, находящихся в сыпучем виде, а также для получения микро- и наноразмерных порошков, повышения степени диспергирования металлических и керамических порошков [5].

Устройство для ультразвукового помола порошка содержит механический измельчитель вместо цилиндрической камеры с жидкостью, связанный через концентратор с источником ультразвуковых колебаний, и рабочую зону. Механический измельчитель выполнен в виде шайбы, закрепленной на торце концентратора ультразвуковых колебаний, а рабочая зона – в виде камеры с размерами, создающими условия для резонанса. Последняя закреплена на отражателе полуволновой длины, что позволяет изолировать массу рабочего стола и сконцентрировать всю энергию ультразвука в рабочем объеме активируемого порошка. Для обеспечения и контроля постоянной силы прижима механического измельчителя отражатель полуволновой длины смонтирован на динамометре. Механический измельчитель в рабочей зоне камеры прижимается с определенным усилием к порошку и в течение некоторого времени происходит активное измельчение механоактивируемого порошка за счет многократных ударов торца измельчителя.

На предложенном устройстве проводили экспериментальные исследования процесса механоактивации порошков титаната бария и порошка оксида цинка. Порошок титаната бария, прошедший гранулометрический анализ, тщательно перемешивали и засыпали в камеру слоем толщиной 3 мм. Статическое усилие прижатия механического измельчителя составляло 80 Н. Выбраны следующие параметры ультразвукового измельчения: постоянная частота колебаний 22 кГц, амплитуду ультразвуковых колебаний изменяли в пределах от 5 до 35 мкм, а продолжительность взаимодействия на порошок – от 1 до 4 мин.

В результате ультразвуковой обработки порошков установлено, что с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний от 5 до 35 мкм размер частиц порошка уменьшился с 0,3 мкм до 60 нм при времени обработки, равном 1 мин, а при времени обработки 4 мин размер частиц порошка составил 30 нм.

Заключение. Использование энергии мощных ультразвуковых колебаний в процессах поверхностной обработки некоторых изделий автомобильной и тракторной техники является перспективным направлением исследований. Ультразвуковая обработка приводит к кардинальным изменениям структуры поверхности и приповерхностных слоев изделий. Так, отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием с наложением мощных ультразвуковых колебаний позволяет уменьшить высоту микронеровностей и в поверхностных слоях создает благоприятную эпюру остаточных сжимающих напряжений; под воздействием ультразвука происходят дробление и перераспределение структуры обрабатываемого материала на определенную глубину, зависящую от множества факторов (в частности, от интенсивности ультразвуковых колебаний и времени их воздействия). С увеличением интенсивности ультразвука глубина упрочненного слоя металла возрастает и в нем образуются микро- и наноструктуры, которые обеспечивают повышение эксплуатационных характеристик изделий.

Исследованы процессы ультразвукового диспергирования порошков различного состава в жидкости, а также порошков, находящихся в сыпучем (сухом) состоянии. Показано, что с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний время обработки значительно сокращается, а размеры частиц порошка уменьшаются в 10–100 раз.

Список использованной литературы

1. *Артемьев, В. В.* Ультразвуковые виброударные процессы / В. В. Артемьев, В. В. Клубович, В. Н. Сакевич. – Минск: БНТУ, 2004. – 258 с.
2. *Абрамов, О. В.* Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. / О. В. Абрамов. – М.: Янус-К, 2006. – 687 с.
3. Устройство для ультразвуковой ударной обработки внутренней поверхности вращения: пат. 18751 Респ. Беларусь: МПК В24В39/02 (2006) / В. В. Клубович, В. А. Томило, Е. В. Хрущев, А. С. Липницкий; дата публ.: 30.12.2014.
4. Способ контактной ультразвуковой обработки изделий или материалов в жидкой среде под избыточным давлением: пат. 10693 Респ. Беларусь: МПК В08В3/12 (2006) / А. С. Еремеев, В. В. Клубович, В. Ф. Луцко; дата публ.: 30.06.2008.
5. Устройство для ультразвукового помола порошка: пат. 19076 Респ. Беларусь: МПК В02С17/00 (2006) / В. В. Клубович, В. А. Томило, Е. В. Хрущев, А. С. Липницкий, В. И. Марусич, А. В. Абрамова; дата публ.: 30.04.2015.

Поступила в редакцию 03.12.2015