

2. Kirichek, A.V. Determination of the energy parameters of the shock mechanism user to harden the surface by plastic deformation. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol.756. - pp. 85-91.

3. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Altukhov, A.Yu. Metal deformation-wave strengthening. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2014. Vol.5. No.6 pp. 03069-1-03069-4.

4. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Khandozhko, A.V., Silantiev, S.A., Fedonina, S.O., Maslyukov, Shmat, A.S. Investigation of strengthening parameters impact upon material structural constituents // *Science Intensive and Vibration-Wave*

Technologies of Parts Machining for High-Tech Products. Proceedings of the Inter. Symposium of Technologist-Engineering Workers. – Rostov-upon-Don, September 26-28, 2018. – pp. 277-282.

5. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Khandozhko, A.V., Fedonina, S.O. Technological support of carrying layer parameters by deformation and combined strengthening // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No. 10 (88). – pp. 43-48.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдец

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.30987/article_5c90a596bf6679.61270022

С.И. Агапов, д.т.н.,

Ю.И. Сидякин, д.т.н.,

А.Ф. Толстяков, аспирант

(Волгоградский государственный технический университет,
400050 г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28)

E-mail: techmach@vstu.ru

Научно обоснованное повышение надежности пьезоэлектрических преобразователей для ультразвуковой обработки зубчатых колес

Рассмотрены вопросы рациональных условий сборки и настройки пьезоэлектрических преобразователей, а также вопросы расчета мощности ультразвукового генератора на примере экспоненциального концентратора с присоединенной заготовкой при зубонарезании мелко модульных зубчатых колес.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь; экспоненциальный концентратор; мощность ультразвукового генератора.

S.I. Agapov, Dr. Sc. Tech.,

Yu.I. Sidiyakin, Dr. Sc. Tech.,

A.F. Tolstyakov, Post graduate student

(Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400050)

Scientifically substantiated increase of piezoelectric transformer reliability of cog-wheel ultrasonic machining

The paper reports the consideration of efficient conditions for assembly and adjustment of transformers and also the problems of power calculation for an ultrasonic generator by the example of an exponential concentrator with an attached blank during fine-grained cog-wheel gear cutting.

Keywords: piezoelectric transformer; exponential concentrator; capacity of ultrasonic generator.

При резании труднообрабатываемых материалов сталкиваются с целым рядом трудностей. Одним из наиболее эффективных способов лезвийной обработки является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) с частотой 18...22 кГц.

Введение УЗК в зону резания возможно от

магнитострикционного преобразователя и пьезоэлектрического преобразователя. Применение магнитострикционного преобразователя требует подвода охлаждающей жидкости. Если магнитострикционный преобразователь вращается, то требуется установка уплотнителей, что снижает его надежность. Следует

учитывать, что магнитострикционный преобразователь имеет большие размеры по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями. Следовательно, ультразвуковые головки на основе магнитострикционных преобразователей не могут применяться на зуборезных станках для нарезания мелко модульных колёс.

В настоящее время широкое распространение получили компактные пьезоэлектрические преобразователи, для их изготовления используются пьезокерамические кольца, изготовленные на основе титанита-цирконатов свинца. В России они, как правило, имеют маркировку ЦТС, в Европе – PZ, в Японии – PZT.

При сборке пьезоэлектрических преобразователей большое значение имеют вопросы рациональных условий сборки для получения максимальной амплитуды колебаний на излучающем торце. Во многих работах [1, 3, 4] показано, что рациональной амплитудой УЗК ξ для механической обработки является 4...6 мм. На рис.1 приведен пьезоэлектрический преобразователь.

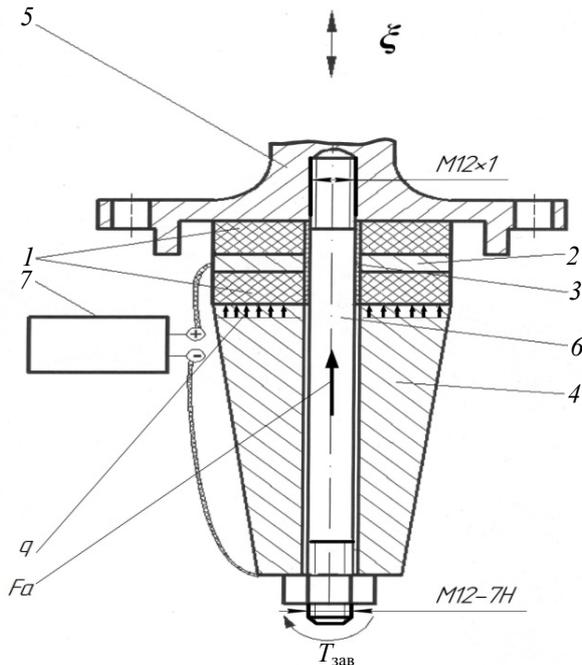


Рис. 1. Пьезоэлектрический преобразователь

Известные ультразвуковые устройства имеют невысокий технический уровень, определяемый невозможностью рационального выбора материала наиболее слабого звена – центральной соединительной шпильки. Пьезоэлектрический преобразователь содержит два пьезокольца 1 между которыми заключена металлическая прокладка из отожженной меди 2 и изолирующая втулка из электротехни-

ческого текстолита 3, которые сжимаются накладками 4 и 5, при этом накладка 4 является отражающей, а накладка 5 – излучающей. Излучающая накладка выполнена из стали 40X, закаленная до 44...46 HRC₃, а отражающая – из стали 10. Жесткий акустический контакт осуществляется с помощью соединительного элемента в виде шпильки 6 и гайки 8. Завинчивание осуществляется динамометрическим ключом. С ультразвукового генератора 7 подаются электрические сигналы на пьезоэлектрический преобразователь.

Большой проблемой долговечности работы пьезоэлектрического преобразователя является работоспособность центральной шпильки при работе пьезоэлектрических преобразователей под нагрузкой. В связи с большим влиянием напряженного состояния на стойкость крепежного соединения, повышение срока его гарантийной работы может быть достигнуто при максимальном уменьшении в нем знакопеременных напряжений. В связи с этим в концентраторах следует избегать резких перепадов сечений. Особое внимание следует уделять резьбовым соединениям, т. к. именно в зоне резьбы происходит возрастание напряжения, которое может привести к разрушению соответствующего элемента колебательной системы [2, 5, 7].

Очень важно при сборке ультразвукового блока (накладка, пьезоэлектрические кольца, концентратор) обеспечить прочное и плотное соединение поверхностей накладок и пьезоэлектрических преобразователей. Для улучшения работы блока между накладкой, пьезоэлектрическими кольцами и концентратором устанавливаются прокладки, изготовленные из мягкой отожженной медной фольги. Перед сборкой поверхности в местах соединения тщательно протираются и обезжириваются спиртом.

Наиболее прочное соединение пьезоэлектрического блока достигается путем стягивания накладки, 2-х пьезоэлектрических преобразователей и концентратора при помощи центральной шпильки и гайки, так как именно оптимальная затяжка во многом определяет амплитуду колебаний на торце инструмента и долговечность шпильки.

Для практики настройки пьезоэлектрического преобразователя большое значение имеет давление на пьезоэлементы при сборке:

– среднее давление на пьезоэлектрический преобразователь, МПа,

$$q_{cp} = F_a / S_{пк} \quad (1)$$

где F_a – осевая нагрузка на пьезоэлемент, Н; $S_{\text{пк}}$ – площадь пьезоэлектрического кольца, мм².

Осевая нагрузка на пьезоэлемент рассчитывается по формуле [8]:

$$F_a = \frac{2 \times T_{\text{зав}}}{[f_{\text{т}} \times D_{\text{ср(г)}} + d_2 \times \text{tg}(\gamma + \varphi')]} \quad (2)$$

где $T_{\text{зав}}$ – момент закручивания гайки, Н·м; $f_{\text{т}}$ – коэффициент трения на торце гайки; $D_{\text{ср(г)}}$ – средний диаметр опорной поверхности гайки, мм; d_2 – средний диаметр резьбы, мм; γ – угол подъема средней винтовой линии резьбы, °; φ' – приведенный угол трения, °.

Исследования проводились на пьезоэлектрическом преобразователе, собранном при помощи центральной шпильки и гайки. При этом соединение концентратора и центральной шпильки происходит по резьбе М12×1 -7Н, для этого резьбового соединения в данном случае принимается $f_i \approx 0,17$; $D_{\text{ср(г)}} = 16,2$ мм; $d_2 = 10,5$ мм; $\gamma = 3^\circ$; $\varphi' = 11^\circ$. Размеры пьезоэлектрического кольца: $D = 46$ мм; $d = 16$ мм.

Подставляя приведенные данные в формулы (1) и (2), получим значения среднего давления на пьезоэлектрический преобразователь при сборке. Момент закручивания изменялся от 30 до 150 Н·м (что соответствует $q = 5 \dots 25$ МПа), при этом напряжение возбуждения пьезоэлектрических преобразователей уменьшается с 120 до 25 В (рис. 2), что позволяет подвести повышенное напряжение к пьезоэлектрическим преобразователям, при этом амплитуда УЗК на торце инструмента также увеличивается с 2 до 6 мкм (см. рис. 2), т.е. наиболее простой способ увеличения амплитуды УЗК – повышение момента закручивания при сборке пьезоэлектрического блока.

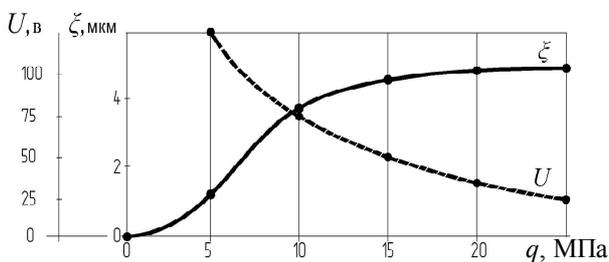


Рис. 2. Влияние крутящего момента на напряжение возбуждения и амплитуду колебаний рабочего торца излучающей накладки ультразвукового блока

Однако с увеличением момента закручивания увеличиваются и напряжения в шпильке,

что ведет к ее разрушению, поэтому были проведены эксперименты по определению работоспособности центральной шпильки пьезоэлектрического блока и выработки рекомендаций по выбору материала шпильки. Фотографии разрушения этих шпилек по резьбе 12×1 представлены на рис. 3. В данных условиях $T_{\text{зав}}$ составляет 30...150 Н·м ($q = 5 \dots 25$ МПа), так как при этом обеспечивается оптимальное сочетание амплитуды УЗК на торце инструмента и долговечности шпильки ультразвуковой головки.

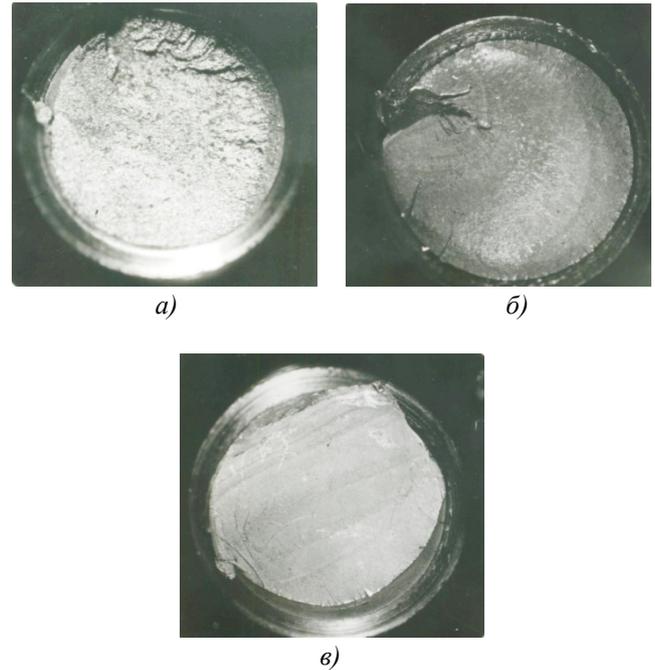


Рис. 3. Разрушение шпильки ультразвукового блока по резьбе М12х1:

а – материал шпильки 40Х (44...46HRC₃); б – материал шпильки сталь 40 (30...32 HRC₃); в – материал шпильки 12Х18Н10Т

Как видно из приведенных фотографий разрушению шпильки предшествует развитие опережающей трещины, причем, чем тверже материал, тем трещина имеет большие размеры.

Результаты экспериментов свидетельствуют о сложном воздействии УЗК на процесс пластического деформирования и разрушения шпилек-образцов. По данным работы [3] установлено, что условные пределы текучести всех материалов при ультразвуковом нагружении уменьшаются при соответствующем повышении растяжения. Такое изменение физико-механических свойств металлов может быть объяснено теорией дислокаций.

В соответствующей теории деформационного упрочнения предполагается, что упроч-

ненный материал содержит дислокации, которые расположены беспорядочно, а внутри кристалла имеются хаотически распределенные внутренние напряжения. Знакопеременные напряжения увеличивают напряжения в кристаллах.

Для объяснения процесса разрушения металла при знакопеременном напряжении в настоящее время широко распространение получила теория Мотто. При получении УЗК предполагается, что выделяемая при этом энергия вызывает периодические колебания активных дислокаций возле положения равновесия.

Согласно цепной теории дислокаций при столкновении единичных дислокаций образуются группы малоподвижных «сидячих» дислокаций, благодаря чему в металле возникают субмикротрещины. Их накопление на границах или внутри зерен вызывает потерю устойчивости материала, т.е. ослабление прочности металла и снижение модуля упругости, которое возрастает с увеличением амплитуды УЗК. Слияние соседних субмикротрещин образует усталостную трещину.

Наложение УЗК на металл способствует более быстрому наступлению потери устойчивости кристаллических решеток при воздействии внешних нагрузок. При статических нагружениях с наложением УЗК на испытываемый образец, условный предел текучести материалов снижается на 10...21 % [3]. Поэтому наиболее нагруженную деталь (шпильку ультразвукового блока), находящуюся под воздействием УЗК, следует изготавливать из материалов с возможно большим пределом текучести, что подтверждается и проведенными опытами со шпильками, изготовленными из стали 40X, закаленной до 44...46 HRC₃; стали 40 с 30...32 HRC₃ и стали 12X18H10T.

Исследования по определению оптимальной марки материала для изготовления соединительных элементов показали, что время работы до разрушения при моменте завинчивания 150 Н·м ($q = 25$ МПа), были следующие:

- для шпильки, изготовленной из стали 40X и закаленной до 44...46 HRC₃ ≈ 40 ч;
- для шпильки, изготовленной из стали 40, закаленной до 30...32 HRC₃ ≈ 120 ч;
- для шпильки, изготовленной из стали 12X18H10T, – свыше 800 ч.

Результаты эксперимента свидетельствуют о сложном воздействии УЗК на процесс пластического деформирования и разрушения шпилек-образцов. На всех шпильках наблюдается опережающая трещина. На основании

проведенных исследований можно сделать вывод: резьбовая часть шпильки, присоединенная к излучающей накладке (концентратору) должна выполняться на резьбошлифовальном станке для уменьшения концентратора напряжений. Наилучшие результаты наблюдаются при изготовлении шпильки из стали 12X18H10T.

Условные пределы текучести всех материалов при ультразвуковом нагружении уменьшаются, что может быть объяснено теорией дислокаций.

Для выполнения операций, связанных с введением УЗК в зону резания, требуется передача интенсивного ультразвукового воздействия от пьезоэлектрического преобразователя к заготовке, это осуществляется с помощью различных концентраторов.

Значительный интерес представляют составные концентраторы, образованные соединением стержней переменного сечения, которые позволяют получать значительно большие коэффициенты усиления, по сравнению с концентраторами простейших типов (при одинаковых размерах основания) [1, 3, 4].

Волноводно-излучательные системы со ступенчатыми концентраторами характеризуются узкой полосой рабочих частот и, следовательно, весьма ограниченной возможностью подстройки по частоте при изменении нагрузки. Особенно перспективными являются ступенчатые концентраторы с переходным экспоненциальным участком, который расширяет полосу частот, в пределах которой концентратор и инструмент могут работать с достаточной эффективностью, и ослабляет напряжения, возникающие в месте сопряжения концентратора и заготовки.

Как и обычные они позволяют при небольших размерах входного сечения получать высокие значения коэффициента усиления, однако, наличие переходного экспоненциального участка уменьшает концентрацию напряжений и обеспечивает наиболее благоприятные условия для распространения колебаний, улучшает их прочностные свойства и способность трансформировать нагрузку без существенного изменения резонансного режима в колебательной системе. При небольшой длине переходной части её влияние сказывается в основном на резонансной части системы.

Некоторые преимущества экспоненциального концентратора перед ступенчатым выявляются также в результате исследования влияния реактивной нагрузки. Износ инструмента приводит к изменению реактивной на-

грузки, а так как коэффициент пересчёта для ступенчатого и конического концентратора выше, чем для экспоненциального, в первом и втором случаях происходит существенно большая расстройка колебательной системы. Следовательно, когда относительный износ инструмента велик, не следует применять ступенчатые концентраторы, хотя они имеют большой коэффициент усиления по смещению.

Применение концентраторов с расчётными волновыми длинами в качестве рабочих частотопонижающих накладок составных пьезо-керамических преобразователей даёт ощутимый эффект при использовании высокочувствительной пьезокерамики с малыми диэлектрическими потерями или при работе концентратора на небольшую нагрузку. При этом уменьшаются потери в колебательной системе, что обуславливается несколькими причинами.

Во-первых, поскольку пьезоэлемент смещается от узловой области преобразователя в сторону нерабочего торца, продольный размер накладки (выполненной из стали 20, т.е. материала с большим волновым сопротивлением) сокращается; а так как накладка-концентратор выполнена из материала с меньшим волновым сопротивлением (сталь 40X, закалена до 44...46 HRCэ), то продольный размер всего преобразователя, рассчитанного на ту же частоту, должен существенно сократиться, в результате чего накладка уменьшится почти вдвое. Соответственно снижаются и потери.

Во-вторых, вся область больших деформаций (т.е. область максимальных потерь) располагается теперь в материале с малым волновым сопротивлением и затуханием.

Хорошие акустические свойства имеют закалённые стали. Термообработка стали (закалка с низким отпуском) позволяет в 2 раза снизить потери. При увеличении амплитуды колебаний и температуры, потери возрастают.

На рис. 4 представлен экспоненциальный концентратор с заготовкой, для нарезания мелкозубчатых колес.

Для успешной работы ультразвукового приспособления необходимо рассчитать его мощность и подобрать оптимальный генератор по мощности.

Момент инерции концентратора совместно с заготовкой равен:

$$J = J_{k1} + J_{k2} + J_{k3} + J_4, \quad (3)$$

где J_{k1} – момент инерции части концентратора диаметром D_1 ; J_{k2} – момент инерции экспо-

ненциальной части концентратора; J_{k3} – момент инерции части концентратора диаметром D_2 ; J_4 – момент инерции заготовки.

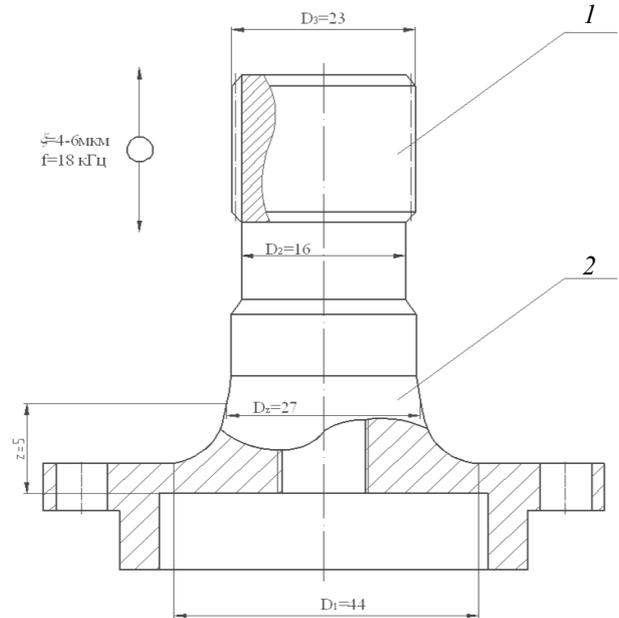


Рис. 4. Экспоненциальный концентратор с заготовкой:

1 – заготовка; 2 – концентратор

Расшифруем значения J_{k1} , J_{k2} , J_{k3} , J_4 [8]:

$$\begin{aligned} J_{k1} &= \frac{\pi \gamma D_1^4 \ell_1}{32g}; & J_{k2} &= \frac{\gamma S_0^2 \ell}{2\pi g} \int_0^\ell e^{-2\beta z} dz; \\ J_{k3} &= \frac{\pi \gamma D_2^4 \ell_2}{32g}; & J_4 &= \frac{\pi \gamma D_3^4 \ell_3}{32g}; \end{aligned} \quad (4)$$

где γ – удельный вес материала концентратора, $\gamma_u = 7,8$ г/см³ (сталь 40X); D_1 – диаметр наружного кольца пьезоэлектрического преобразователя, $D_1 = 44$ мм; D_2 – диаметр контрольного сечения переходного экспоненциального участка; D_3 – диаметр излучающего торца пьезоэлектрического блока, $D_3 = 16$ мм; D_4 – диаметр заготовки, $D_4 = 23$ мм, принимаем исходя из конструктивных данных заготовки; l_1 – толщина мембраны, $l_1 = 3$ мм принимаем исходя из конструкции ультразвукового преобразователя; l_2 – длина излучающего торца пьезоэлектрического блока, $l_2 = 12$ мм; z – расстояние от торца кольца пьезоэлектрического преобразователя до контрольного сечения, определяется с помощью номограмм [4]; γ_u – удельный вес материала заготовки, $\gamma_u = 8,4$ г/см³ (БрАЖМЦ); $l_{заг}$ – длина заготовки, $l_{заг} = 24$ мм, принимаем исходя из конструктивных данных

заготовки.

Максимальная угловая скорость на торце заготовки определяется зависимостью [4]:

$$\omega = \frac{4\pi f \xi}{d_u}, \quad (5)$$

где ξ – амплитуда колебаний, подставляя численные значения, получим $\omega = 8,19$ 1/с.

Изменение кинематической энергии вращающейся системы рассчитывается по формуле [6]:

$$\Delta E = \frac{J\omega^2}{2} (1 - K^2), \text{ Дж}, \quad (6)$$

подставляя численные значения $J_{k1}, J_{k2}, J_{k3}, J_{k4}$ и $K = 0,555$ – коэффициент восстановления для стали [8], получим $\Delta E = 0,04523$ Дж.

Мощность, расходуемая при одном контактировании инструмента с заготовкой:

$$W_{\max} = \frac{\Delta E}{t_k * 7500}, \quad (7)$$

где t_k – время контакта инструмента и заготовки [7],

$$t_k = \alpha \frac{1}{f_p}, \quad (8)$$

где α – коэффициент времени контакта принимает: $\alpha = 0,37$; f_p – резонансная частота возбуждения пьезокерамики, в данном случае: $f_p = 18000$ Гц. Подставляя численные значения в формулы (7) и (8) получим $W_{\max} = 0,211$ кВт.

Средняя мощность ультразвукового генератора, если принять в расчёт синусоидальный закон изменения действующей силы, рассчитывается по формуле:

$$W_{cp} = \frac{W_{\max} * 2}{3,14} = \frac{0,211 * 2}{3,14} = 0,134 \text{ кВт}.$$

Следовательно, для зубонарезания мелко-модульных зубчатых колес с применением УЗК можно использовать генератор мод. УЗГ 3-0,25 мощностью 0,25 кВт с блоком поднастройки по частоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Агапов, С.И.** Интенсификация процесса обработки труднообрабатываемых материалов при введении ультразвуковых колебаний в зону резания: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2009. – 78 с.
2. **Агапов, С.И.** Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука: Монография / С.И. Агапов, В.В. Головкин. – Самара: Изд-во СНЦ, 2010. – 134 с.

3. **Агапов, С.И., Сидякин, Ю.И., Корпелянский, О.Ф.** Повышение точности отверстий при развёртывании в деталях из труднообрабатываемых материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 6 (84). – С. 18-23.

4. **Агапов, С.И., Сидякин, Ю.И.,** Нарезание мелко-модульных зубчатых колес с использованием энергии ультразвуковых колебаний: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – 288 с.

5. **Бржозовский, Б.М., Бекренев, Н.В.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машиностроении: учеб. пособие. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. – 348 с.

6. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 341 с.

7. **Асташев, В.К.** О нелинейной динамике ультразвуковых технологических процессов и систем // Вестник научно-технического развития – 2007. – №2 – С.12-18.

8. **Иосилевич, Г.Б., Строганов, Г.Б., Маслов, Г.С.** Прикладная механика: учеб. для вузов / под ред. Г.Б. Иосилевича. – М.: Высш. шк., 1989. – 351 с.

REFERENCES

1. Agapov, S.I. *Intensification of Hard-to-Machine Material Machining Process at Ultrasonic Oscillation Introduction in Cutting Area*: monograph. – Volgograd: VolgSTU, 2009. – pp. 78.

2. Agapov, S.I. *Machining Effectiveness Increase through Ultrasound Use*: monograph / S.I. Agapov, V.V. Golovkin. – Samara: SNC Publishing House, 2010. – pp. 134.

3. Agapov, S.I., Sidiyakin, Yu.I., Korpelyansky, O.F. Opening accuracy increase during hard-to-machine parts reaming / *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.6 (84). – pp. 18-23.

4. Agapov, S.I., Sidiyakin, Yu.I., *Fine-Grained Cog-Wheel Cutting Using Power of Ultrasonic Oscillation*: monograph. – Volgograd: VolgSTU, 2018. – pp. 288.

5. Brzhozovsky, B.M., Bekrenev, N.V. *Ultrasonic Technological Processes and Equipment in Mechanical Engineering and Instrument Making Industry*: manual. – Saratov: Saratov State Technical University, 2009. – pp. 348.

6. Suslov, A.G. *Parameter State Technological Support of Parts Surface Layers*. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 341.

7. Astashev, V.K. On non-linear dynamics of ultrasonic engineering procedures and systems // *Bulletin of Scientific-Technological Development* – 2007. – No.2 – pp. 12-18.

8. Iosilevich, G.B. Stroganov, G.B., Maslov, G.S. *Applied Mechanics*: college textbook / under the editorship of G.B. Iosilevich. – М.: Higher School, 1989. – pp. 351.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский