



Изготовление деталей гидросистем сельскохозяйственных машин в условиях ультразвукового резания

В. А. Скрябин

*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
(г. Пенза, Российская Федерация)*

vs_51@list.ru

Введение. В статье решены проблемные вопросы по снижению силовых параметров при обработке тонкостенных втулок гидросистем сельскохозяйственных машин путем наложения ультразвуковых колебаний на режущий инструмент для достижения заданной точности обработки и шероховатости поверхности деталей.

Материалы и методы. В работе использованы положения технологии ультразвукового резания. Для оценки изменения силы резания в тангенциальном направлении было разработано специальное приспособление для сообщения режущему инструменту ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении и проведены соответствующие эксперименты.

Результаты исследования. Готовится к реализации модернизация токарно-винторезного станка со специальным устройством для осуществления процесса ультразвукового резания тонкостенных деталей невысокой жесткости. Модернизированный станок состоит из блоков обработки и измерения данных экспериментальных исследований, соединенных с персональным компьютером. Модернизированный станок позволяет дать оценку изменению сил резания при традиционном точении и ультразвуковом резании для реализации заданной точности и шероховатости процесса обработки поверхности детали.

Обсуждение и заключение. Обработка деталей невысокой жесткости в рамках рассматриваемой технологической системы на модернизированном оборудовании показала, что при эффективных условиях изготовления тонкостенных втулок сельскохозяйственных машин (глубине резания и скорости резания) снижается радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, что позволяет уменьшить энергозатраты процесса резания и стабилизировать качество обработки.

Ключевые слова: точение, ультразвук, глубина резания, подача, скорость резания, модернизация, станок

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Скрябин, В. А. Изготовление деталей гидросистем сельскохозяйственных машин в условиях ультразвукового резания / В. А. Скрябин. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.624-636](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.624-636) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 624–636.



Manufacturing Parts for Hydraulic Systems of Agricultural Machinery under Conditions of Ultrasonic Cutting

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russian Federation)

vs_51@list.ru

Introduction. The article deals with the problem of reducing the efforts when processing thin-walled bushings for hydraulic systems of agricultural machines with the ultrasonically activated cutting tool to achieve the specified processing accuracy and surface roughness of parts. **Materials and Methods.** The article describes the technological standards for ultrasonic cutting. To assess the change in the tangential cutting force, a special device was developed to activate ultrasonically the tool for tangential cutting and corresponding experiments were carried out.

Results. An upgrading of a screw-cutting lathe equipped with a special device for ultrasonic cutting of low rigidity thin-walled parts is currently being carried out. The upgraded lathe consists of blocks for processing and measuring experimental research data connected to a personal computer. The upgraded lathe allows evaluating the change in cutting forces under traditional turning and ultrasonic cutting to achieve the specified accuracy and roughness of the part surface during the processing process.

Discussion and Conclusion. Processing low rigidity parts on the modernized equipment has shown that providing the effective conditions of manufacturing thin-walled bushings for agricultural machinery (cutting depth and cutting speed) decreases radial and tangential components of the cutting force that helped to reduce the energy consumption of the cutting process and to stabilize quality of the processing.

Keywords: turning, ultrasound, cutting depth, feed, cutting speed, modernization, machine

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Skryabin V.A. Manufacturing Parts for Hydraulic Systems of Agricultural Machinery under Conditions of Ultrasonic Cutting. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):624-636. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.624-636>

Введение

Снижение тангенциальной составляющей силы резания при обработке тонкостенных деталей типа втулок при ультразвуковом резании является актуальной задачей машиностроения, решение которой позволит стабильно обеспечивать качество процесса обработки.

При использовании обычных технологий довольно часто не удается получить заданную размерную точность и шероховатость поверхности.

Это приводит к разработке совмещенных технологических процессов изготовления вышеуказанных деталей, например, к резанию с применением ультразвуковых колебаний, которое

уменьшает влияние составляющих силы резания при обработке деталей с невысокой жесткостью.

Целью экспериментальных исследований в данной статье является измерение составляющих силы резания при обработке поверхности детали режущим инструментом с наложением ультразвуковых колебаний и сравнение результатов с обычным (традиционным) точением.

Обзор литературы

Резание с применением ультразвука является одним из перспективных методов обработки поверхностей тонкостенных деталей типа втулок, при котором создаются условия, уменьша-

ющие влияние составляющих силы резания для достижения стабильного обеспечения качества и производительности процесса¹ [1–3]. Значительный вклад в разработку теоретических и экспериментальных исследований процесса резания с применением ультразвуковых колебаний внесли А. И. Марков, Г. Г. Иноземцев, М. Л. Хейфец, А. А. Горбунов, О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, В. К. Асташев, М. П. Козочкин, Ч. Либби и др. Однако необходимо отметить, что в работах вышеперечисленных ученых и специалистов далеко не полностью раскрыты вопросы теоретических и экспериментальных исследований по определению составляющих сил резания в условиях наложения ультразвуковых колебаний на режущий инструмент. В связи с этим на предприятии «Гакс-Рем-Арм» (г. Пенза) совместно с кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» были проведены экспериментальные исследования обработки тонкостенных деталей типа втулок на модернизированном токарном станке, оснащенный ультразвуковой установкой и способном реализовать процесс ультразвукового резания для достижения заданной точности и шероховатости поверхности деталей гидросистем сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы

Токарная обработка цилиндрических тонкостенных втулок гидросистем сельскохозяйственных машин осуществлялась на токарно-винторезном станке модели 1М63, оснащенный ультразвуковой колебательной системой

для тангенциального воздействия колебаний на режущий инструмент² [3–5].

Для проведения экспериментальных исследований было спроектировано устройство для воздействия на режущий инструмент ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении (рис. 1).

Высокочастотные ультразвуковые колебания инициировал магнитострикционный преобразователь (МСП) модели ПМС-1-1 с помощью источника питания – ультразвукового генератора УЗГ-1-1 мощностью 63 Вт.

На рисунке 2 показан модернизированный токарно-винторезный станок модели 1М63 с устройством для ультразвукового резания в направлении действия тангенциальной составляющей силы резания.

Структурная схема колебательной системы приведена на рисунке 3.

Источник тока I создает в магнитопроводе МСП переменное магнитное поле ультразвуковой частоты, под действием которого магнитопровод изменяет свой линейный размер на величину Δl_1 .

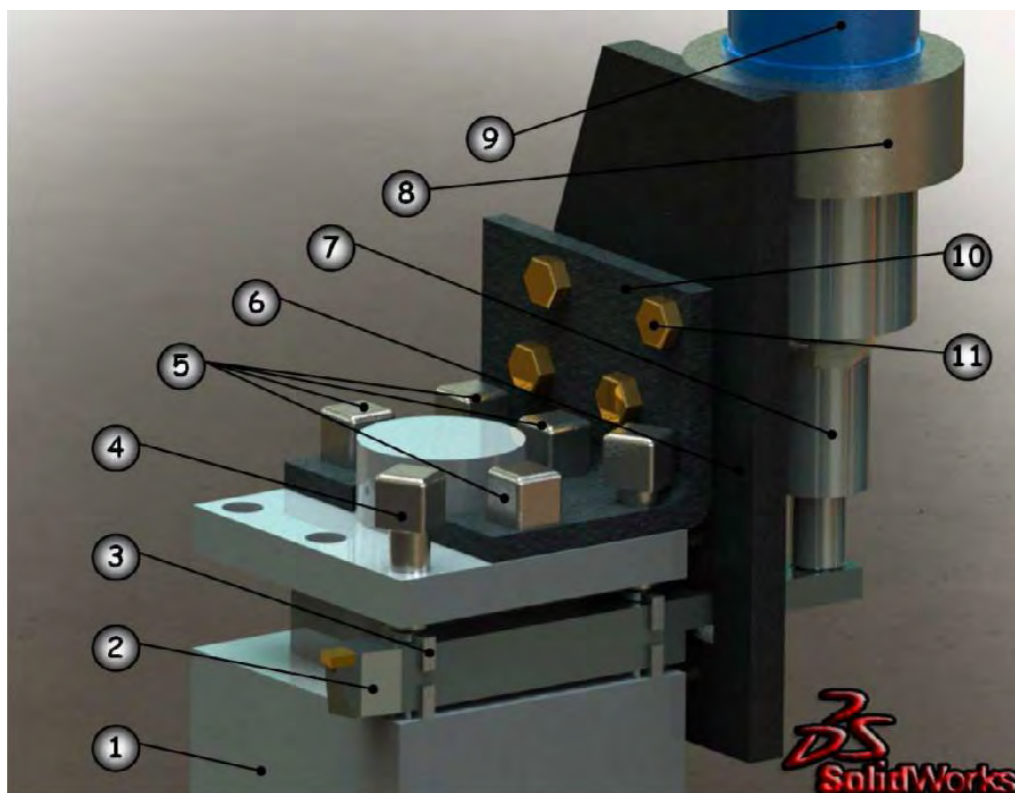
Упругие колебания, излучаемые магнитопроводом, воспринимаются присоединенным к нему ступенчатым акустическим трансформатором (САТ), усиливающим колебания до амплитуды Δl_2 , которые передаются к волноводу В, обеспечивающему на выходе колебания с амплитудой Δl_3 .

Результаты исследования

При проведении экспериментальных исследований в качестве заготовки использовалась тонкостенная цилиндрическая втулка диаметром 50 мм,

¹ Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.; Иноземцев Г. Г., Захаров В. В., Горбунов А. А. Повышение качества резьбы, образованной выдавливающими метчиками при воздействии ультразвука // Опыт промышленного применения ультразвуковой техники и технологии. М.: 1976. С. 72–77; Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.; Агапов С. И. Определение истинной скорости резания при ультразвуковом зубофрезеровании // Прогрессивные технологии в машиностроении: Материалы межвузовского сборника научных трудов. Волгоград, 2002. С. 3–7.

² Агапов С. И. Определение истинной скорости резания при ультразвуковом зубофрезеровании; Козочкин М. П. Виброакустическая диагностика технологических процессов. М.: Каталог, 2005. С. 125–130.



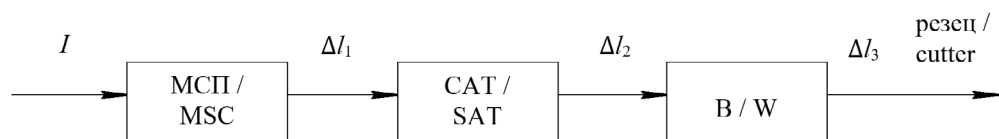
Р и с. 1. Вертикальное устройство для воздействия на режущий инструмент ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении: 1 – резцедержатель; 2 – токарный резец с удлиненной державкой, прикрепленный через шпильку к концентратору 7; 3 – опоры для установки между ними инструмента в рабочее положение; 4 – винты для закрепления инструмента; 5 – винты для закрепления резцедержателя; 6 – вертикальный стальной лист; 7 – ступенчатый преобразователь упругих колебаний (концентратор), установленный вертикально; 8 – кольцо, приваренное к стальному листу, на котором закреплен по наружной резьбе магнитострикционный преобразователь 9; 10 – стальной уголок, прикрепленный к резцедержателю 1 с помощью винтов 5; 11 – винты для закрепления в вертикальном положении к стальному уголку 10 магнитострикционного преобразователя 9, кольца 8, ступенчатого преобразователя упругих колебаний 7 и стального листа 6

F i g. 1. Vertical device for influencing the cutting tool ultrasonic vibrations in the tangential direction:
 1 – tool holder; 2 – longitudinal turning tool attached through a stud to the concentrator 7;
 3 – supports for installing the tool between them in the working position;
 4 – screws for fixing the tool; 5 – screws for fixing the tool holder; 6 – vertical steel sheet;
 7 – step converter of elastic vibrations (concentrator), mounted vertically;
 8 – ring welded to the steel sheet, which is fixed on the external thread magnetostrictive converter 9;
 10 – steel angle, attached to the tool holder 1 with screws 5; 11 – screws for fixing in a vertical position to the steel angle 10 of the magnetostrictive transducer 9, the ring 8, the step transducer of elastic vibrations 7 and the steel sheet 6



Р и с. 2. Экспериментальное устройство на базе токарно-винторезного станка

F i g. 2. Experimental device based on a screw-cutting lathe



Р и с. 3. Структурная схема колебательной системы: МСП – магнитострикционный преобразователь; CAT – ступенчатый акустический трансформатор; В – волновод

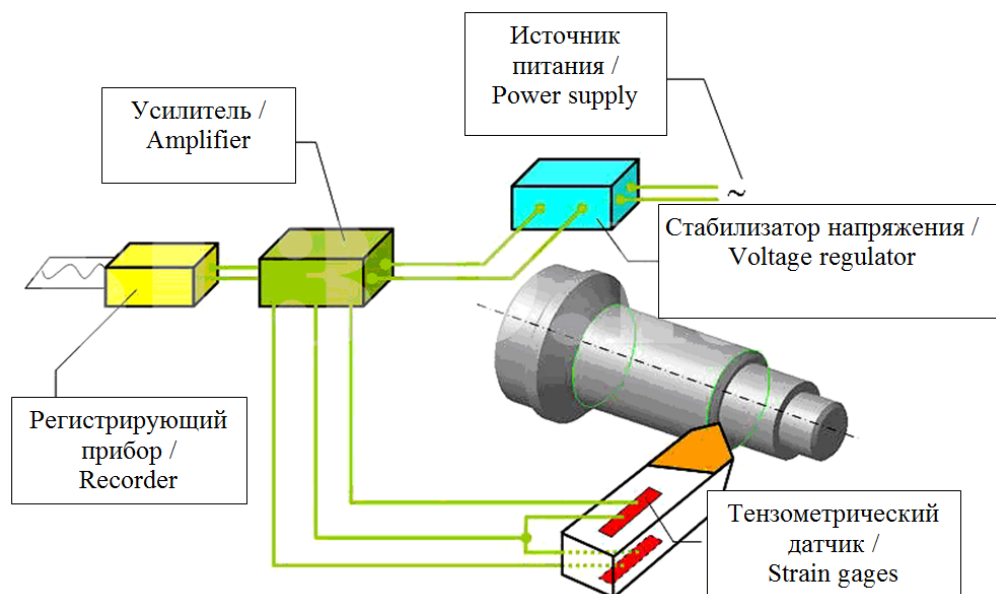
F i g. 3. Block diagram of the oscillating system: MSC – magnetostrictive converter; SAT – step acoustic transformer; W – waveguide

длиной 100–200 мм, толщиной стенки 3–4 мм, изготовленная из улучшенной стали 40Х с $\sigma_b = 650$ МПа. В качестве режущего инструмента применялся токарный проходной отогнутый правый резец с режущей частью в виде четырехгранной неперетачиваемой пластинки из твердого сплава Т15К6 и главным углом в плане $\varphi = 45^\circ$.

Задавались следующие параметры режимов в ходе экспериментов при черновом наружном точении: глубина резания $t = 1,8; 1,2; 0,6$ мм; скорость резания соответствовала значениям $V = 40; 60; 75$ м/мин; подача $s = 0,6$ мм/об; ча-

стота колебаний $f = 20$ кГц. Амплитуда колебаний $a = 10$ мкм на холостом ходу, так как в рабочем режиме амплитуда колебаний уменьшается в зависимости от параметров режима.

Измерение тангенциальной составляющей силы резания P_z осуществлялось с помощью тензорезисторных датчиков, размещенных на державке резца и соединенных с блоками обработки и измерения данных экспериментальных исследований, взаимодействующих с персональным компьютером. Схема измерения составляющей силы резания P_z показана на рисунке 4.



Р и с. 4. Схема измерения тангенциальной составляющей силы резания с использованием тензорезисторных датчиков

F i g. 4. Diagram of measuring the tangential component of the cutting force using strain gages

Результаты измеряемых параметров, транслируемые на монитор компьютера, обрабатывались при помощи специального лицензионного программного продукта PicoLog Recorder (США) и были получены в милливольтгах. Интервал соответствовал одной миллисекунде при многократных повторениях значений выходных параметров.

Для оценки полученных результатов экспериментальных исследований значения измеряемых параметров выбирались таким образом, чтобы серединой была зона перехода от традиционного резания к ультразвуковому.

Для повышения точности измерений выходных параметров использовались мостовые схемы с нормирующими резисторами. По ГОСТу 28836-90 выбрана категория точности датчиков 0,1 с фольговыми тензорезисторами³.

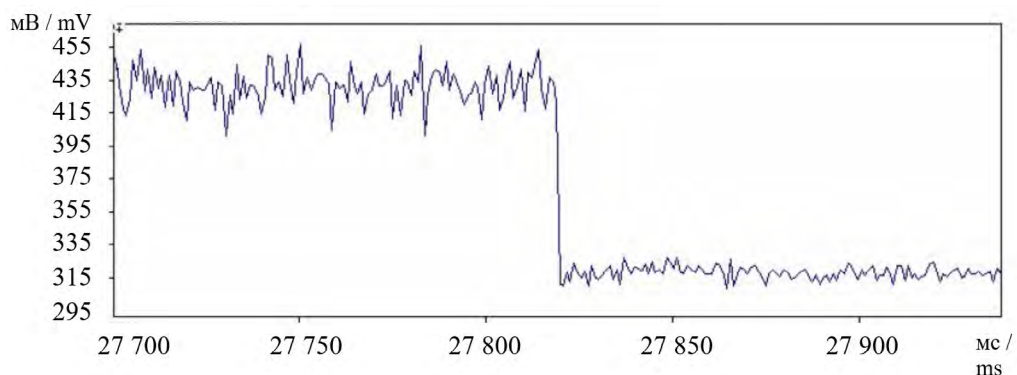
При этом погрешность измерения снижается до 0,1 %.

На рисунках 5–7 приведены графические зависимости значений выходного сигнала во времени при заданных параметрах режимов резания.

На рисунках 8–10 приведены зависимости изменения среднего значения силы P_z как главной составляющей результирующей силы резания R при точении от скорости резания V для традиционного точения и ультразвукового резания при изменении глубины резания t в вышеуказанном диапазоне и при заданном значении подачи режущего инструмента⁴ [6]. Необходимо отметить, что при построении графических зависимостей (рис. 8–10) по осям координат для интервалов среднего значения сил резания и скоростей была принята равномерная сетка для

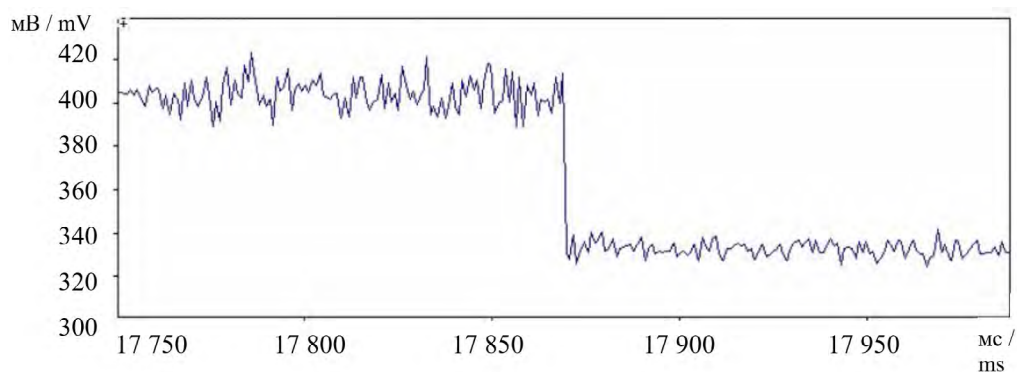
³ ГОСТ 28836-90. Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы испытаний.

⁴ Козочкин М. П. Виброакустическая диагностика технологических процессов.



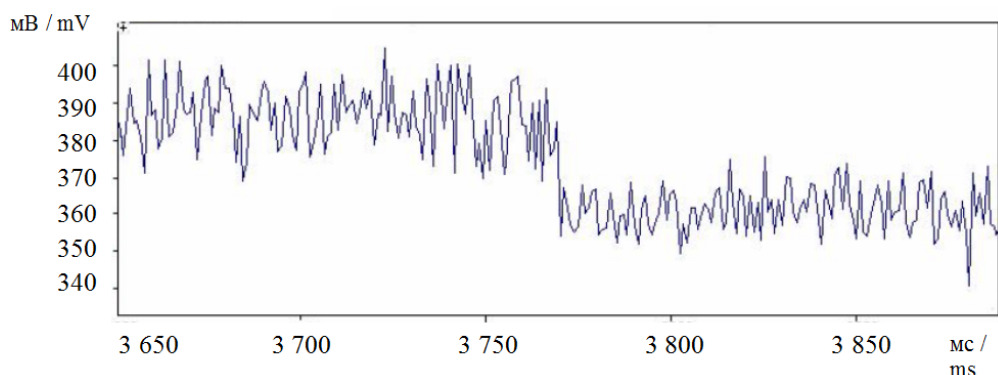
Р и с. 5. Зависимость изменения значений выходного сигнала по времени при получистовом ультразвуковом резании ($t = 1,8$ мм, $V = 40$ м/мин, $Ra = 3,2$ мкм)

F i g. 5. Dependence of the change in the output signal values over time during semi-continuous ultrasonic cutting ($t = 1.8$ mm, $V = 40$ m/min, $Ra = 3.2$ mkm)



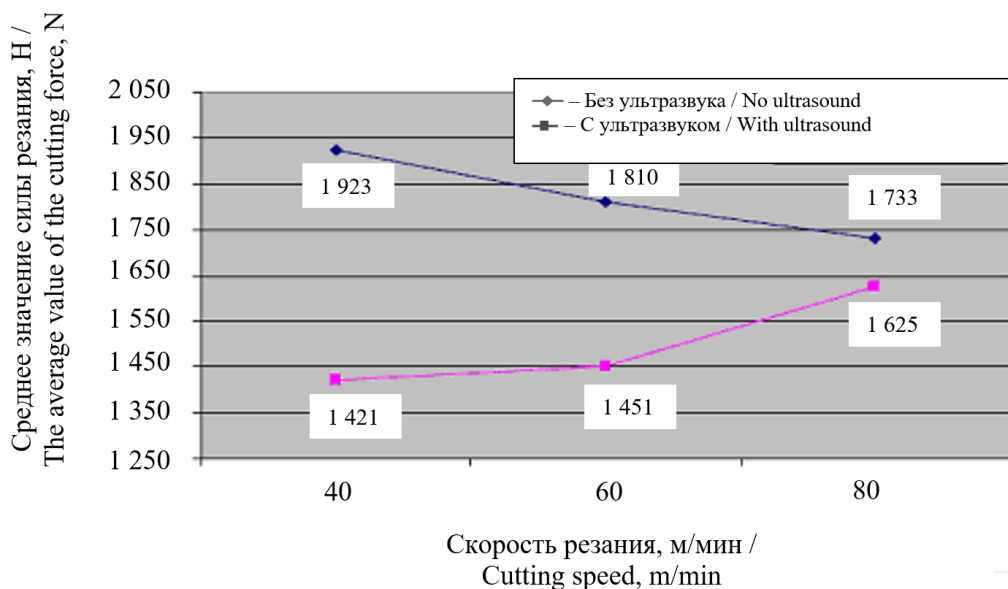
Р и с. 6. Зависимость изменения значений выходного сигнала по времени при получистовом ультразвуковом резании ($t = 1,2$ мм, $V = 60$ м/мин, $Ra = 3,2$ мкм)

F i g. 6. Dependence of the change in the output signal values over time during semi-continuous ultrasonic cutting ($t = 1.2$ mm, $V = 60$ m/min, $Ra = 12.5$ mkm)

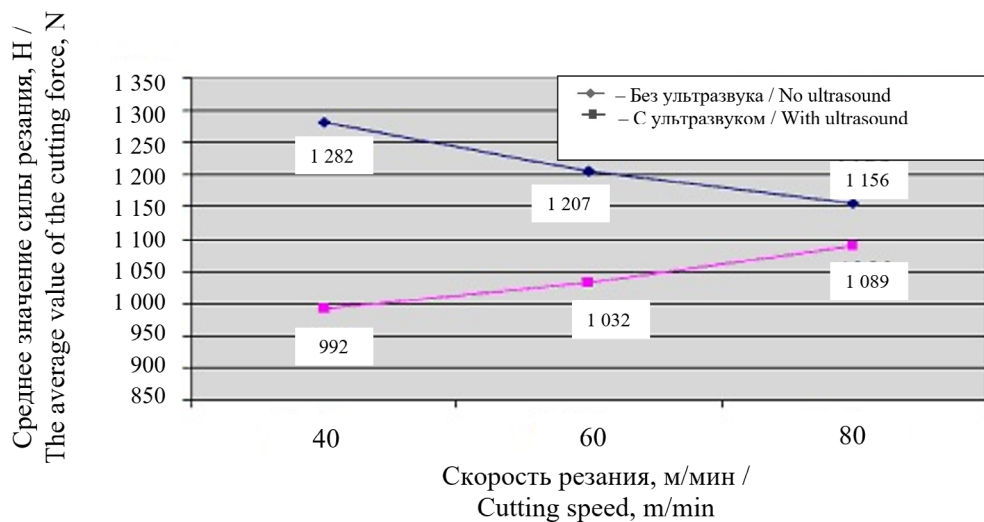


Р и с. 7. Зависимость изменения значений выходного сигнала по времени при получистовом ультразвуковом резании ($t = 0,6$ мм, $V = 75$ м/мин, $Ra = 1,6$ мкм)

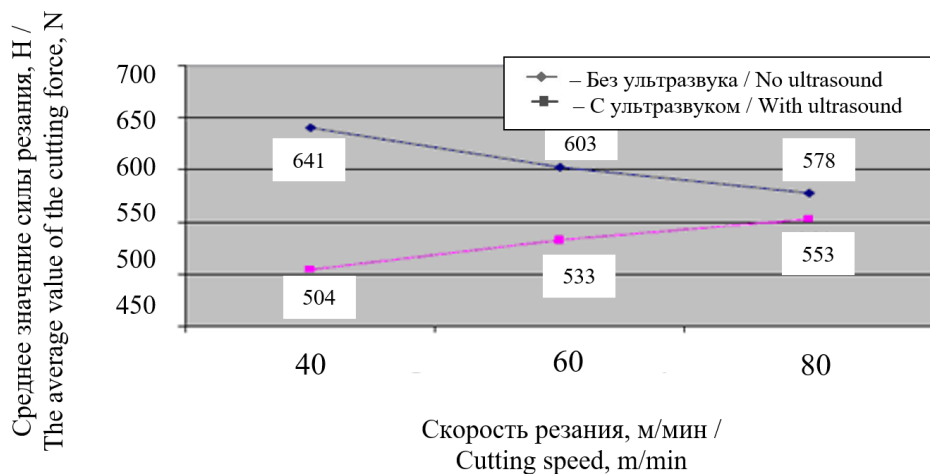
F i g. 7. Dependence of the change in the output signal values over time during semi-continuous ultrasonic cutting ($t = 0.6$ mm, $V = 75$ m/min, $Ra = 6,3$ mkm)



Р и с. 8. Зависимость среднего значения тангенциальной составляющей силы резания P_z от скорости при традиционном точении и точении с наложением ультразвука для $t = 1,8$ мм
 Fig. 8. Dependence of the average value of the tangential component of the cutting force P_z on the speed for traditional turning and ultrasonic cutting for $t = 1.8$ mm



Р и с. 9. Зависимость среднего значения тангенциальной составляющей силы резания P_z от скорости при традиционном точении и точении с наложением ультразвука для $t = 1,2$ мм
 Fig. 9. Dependence of the average value of the tangential component of the cutting force P_z on the speed for traditional turning and ultrasound-applied turning for $t = 1.2$ mm



Р и с. 10. Зависимость среднего значения тангенциальной составляющей силы резания P_z от скорости резания V при традиционном точении и точении с наложением ультразвука для $t = 0,6$ мм
 Fig. 10. Dependence of the average value of the tangential component of the cutting force P_z on the cutting speed V for traditional turning and ultrasound-applied turning for $t = 0.6$ mm

наглядности и более легкого чтения графических зависимостей.

Анализируя зависимости на рисунках 8–10, можно отметить, что при обработке деталей точением без наложения ультразвуковых колебаний среднее значение составляющей силы резания принимает меньшие значения с увеличением скорости резания, а для ультразвукового резания повышение скорости резания увеличивает значение силы резания, которая при этом для всех построенных графиков остается меньше по величине по сравнению с применением обычного точения. Это, по-видимому, связано с уменьшением силы резания при наложении ультразвуковых колебаний [7]. Это происходит за счет более быстрого расклинивания микротрещин поверхностного слоя материала и снижения теплонапряженности процесса стружкообразования [8–11].

Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективной в плане снижения силы резания оказалась обработка с наложением ультра-

звуковых колебаний при обработке тонкостенных деталей со скоростью резания $V = 40$ м/мин и при глубине резания $t = 1,8$ мм. В таком случае уменьшение величины силы резания оказалось в диапазоне 19,78–22,62 %. При скорости $V = 60$ м/мин и глубине $t = 1,2$ мм диапазон изменения силы резания составил 12,87–18,75 %. Наименьший эффект дало резание с наложением ультразвуковых колебаний при $V = 75$ м/мин и глубине $t = 0,6$ мм с диапазоном изменения силы резания от 4,45 до 7,25 %.

Для оценки эмпирической формулы главной составляющей результирующей силы резания P_z при ультразвуковом резании можно использовать коэффициент v_m^5 :

$$v_m = \frac{V(t)}{V},$$

где $V(t)$ – значение колебательной скорости; V – значение скорости резания при традиционном точении.

⁵ Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов.

Эффект от ультразвукового резания достигается, когда $V(t) > V$. В этом случае коэффициент для учета влияния ультразвукового точения $v_1 = 1 / v_m$.

В первом приближении при $f = 20$ кГц $V(t) = 75$ м/мин, $v_m = 75 / 40 = 1,875$, $v_1 = 1 / 1,875 = 0,53$.

Таким образом, эмпирическая зависимость для определения тангенциальной составляющей силы резания P_z в условиях вибрационного резания может быть получена следующим способом:

$$P_z = 10 C_{P_z} t^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} V^{n_{P_z}} K_{P_z} \cdot v_1,$$

где C_{P_z} – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств и структуры обрабатываемого материала детали и материала режущей части инструмента и определяемый по таблицам технологических справочников в зависимости от условий обработки; x_{P_z} , y_{P_z} , n_{P_z} – показатели степени, определяемые по таблицам технологических справочников в зависимости от условий обработки; K_{P_z} – поправочный коэффициент, зависящий от физико-механических свойств и структуры обрабатываемого материала детали и материала режущей части инструмента и определяемый по таблицам технологических справочников в зависимости от условий обработки.

$$K_{P_z} = K_{MP_z} \cdot K_{\varphi P_z} \cdot K_{\gamma P_z} \cdot K_{\lambda P_z} \cdot K_{r P_z},$$

где K_{MP_z} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки на P_z ; $K_{\varphi P_z}$ – учитывает влияние угла φ на P_z ; $K_{\gamma P_z}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние переднего угла в плане режущего инструмента на тангенциальную составляющую силы резания; $K_{\lambda P_z}$ – учитывает зависимость P_z от наклона главной режущей кромки резца; $K_{r P_z}$ – характеризует зависимость P_z от радиуса округления вершины инструмента.

Проведем расчет тангенциальной составляющей силы резания P_z в условиях ультразвукового резания при обработке тонкостенной втулки из стали 40Х:

$$\begin{aligned} C_{P_z} &= 250; x_{P_z} = 1,0; y_{P_z} = 0,75; \\ n_{P_z} &= -0,15; K_{P_z} = 1,08; t = 1,8 \text{ мм}; \\ s &= 0,6 \text{ мм/об}; V = 40 \text{ м/мин}; v_{m. \text{ ср.}} = 0,1; \\ P_z &= 10 \cdot 250 \cdot 18^{1,0} \cdot 0,6^{0,75} \cdot 40^{-0,15} \cdot 1,08 \cdot 0,53 = \\ &= 1051 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Сравнивая значение $P_z = 1470$ Н с величиной P_z по зависимости (рис. 8) для ультразвукового точения, получаем $P_z = 1421$ Н.

Обсуждение и заключение

Проведенные экспериментальные исследования на предприятии «Гакс-Рем-Арма» (г. Пенза) позволили установить эффективные параметры режимов резания тонкостенных цилиндрических втулок гидросистем сельскохозяйственных машин ($V = 40$ м/мин, $t = 1,8$ м/мин, $s = 0,6$ мм/об). При обработке вышеуказанной детали из стали 40Х получистовым точением с заданными технологическими режимами стабильно обеспечиваются необходимые параметры шероховатости поверхностного слоя детали в диапазоне $Ra = 1,6\text{--}3,2$ мкм и точности обработки в пределах IT9–IT11 за счет снижения тангенциальной составляющей силы резания на 19,78–22,62 %. Получена эмпирическая зависимость для расчета тангенциальной составляющей силы резания P_z в условиях ультразвукового резания. Расчеты показали, что относительная погрешность между величиной тангенциальной составляющей силы резания P_z по эмпирической формуле в условиях ультразвукового резания и значением \bar{P}_z , полученным в результате проведения экспериментальных исследований, составляет около 3 %, что указывает на достаточную точность предложенной эмпирической формулы для расчета тангенциальной

составляющей силы резания P_z при наложении ультразвуковых колебаний.

В заключение стоит отметить, что данная работа является продолжением

серии исследований, посвященных актуальной проблеме качественной обработки деталей, которая требует дальнейшего изучения [12–15].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Libby, Ch. C. Sonic Riveting of Aircraft Aluminum Alloys / Ch. C. Libby. – DOI 10.1109/T-SU.1969.29513 // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1969. – Vol. 16, Issue 3. – Pp. 117–125. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1538510> (дата обращения: 29.10.2020).
2. Козочкин, М. П. Особенности стружкообразования при лезвийной обработке с ультразвуковыми вибрациями / М. П. Козочкин, Н. В. Солис-Пинарготе // Машиностроитель. – 2011. – № 2. – С. 29–35.
3. К реализации авторезонансной ультразвуковой технологии / В. К. Асташев, Н. А. Андрианов, М. П. Козочкин [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 6. – С. 52–58. – URL: <http://naukarus.com/k-realizatsii-avtoresonansnoy-ultrazvukovoy-tehnologii> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.
4. Солис, Н. В. Определение угла сдвига стружки при ультразвуковом точении с помощью высокоскоростной видеосъемки // Н. В. Солис, М. П. Козочкин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2010. – № 3. – С. 60–65. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-ugla-sdviga-struzhki-pri-ultrazvukovom-tochenii-s-pomoschyu-vysokoskorostnoy-videosemki> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.
5. Асташев, В. К. О нелинейной динамике ультразвуковых технологических процессов и систем / В. К. Асташев // Вестник научно-технического развития. – 2007. – № 2. – С. 18–25. – URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=29> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.
6. On the Implementation of Ultrasonic Technology / V. K. Astashev, N. A. Andrianov, M. P. Kozochkin [et al.]. – DOI 10.3103/S1052618809060089 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol. 38, Issue 6. – Pp. 566–571. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1052618809060089> (дата обращения: 29.10.2020).
7. Astashev, V. K. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications / V. K. Astashev, V. I. Babitsky. – DOI 10.1007/978-3-540-72061-4. – Berlin : Springer, 2007. – 332 p. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-72061-4> (дата обращения: 29.10.2020).
8. Gubbels, G. P. H. Diamond Turning Of Glassy Polymers / G. P. H. Gubbels. – DOI 10.6100/IR613637. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2006. – 222 p. – URL: <https://research.tue.nl/en/publications/diamond-turning-of-glassy-polymers> (дата обращения: 29.10.2020).
9. Shamoto, E. Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model / E. Shamoto, N. Suzuki, R. Hino. – DOI 10.1016/j.cirp.2008.03.073 // CIRP Annals. – 2008. – Vol. 57, Issue 1. – Pp. 57–60. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850608001327> (дата обращения: 29.10.2020).
10. Ultraprecision Cutting of Molybdenum by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / T. Moriwaiki, H. Suzuki, J. Mizugaki [et al.] // Proceedings of 19th Annual Meeting, American Society for Precision Engineering (ASPE, 2004). – Orlando, 2004. – Pp. 82–92. – URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN055387370/Ultraprecision-Cutting-of-Molybdenum-by-Ultrasonic/> (дата обращения: 29.10.2020).
11. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / N. Suzuki, A. Nakamura, E. Shamoto [et al.]. – DOI 10.1109/MHS.2003.1249936 // MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (19–22 Oct. 2003). – Nagoya : IEEE, 2003. – Pp. 125–135. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1249936> (дата обращения: 29.10.2020).



12. **Скрябин, В. А.** Работоспособность конструкции установки для финишной обработки незакрепленным абразивом среднегабаритных деталей сложного профиля / В. А. Скрябин, И. К. Крамченинов. – DOI [10.15507/0236-2910.027.201704.607-619](https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.607-619) // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 607–619. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/56-17-4/370-10-15507-0236-2910-027-201704-10> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

13. **Скрябин, В. А.** Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности / В. А. Скрябин. – DOI [10.15507/0236-2910.028.201804.552-561](https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561) // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 552–561. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/75-18-4/571-10-15507-0236-2910-028-201804-6> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

14. **Скрябин, В. А.** Особенности расчета кинематических параметров и величины шероховатости при абразивной доводке запорных поверхностей корпусов задвижек, соединяющих трубы / В. А. Скрябин. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201904.546-559](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 546–559. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/737-10-15507-0236-2910-029-201904-5> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

15. **Скрябин, В. А.** Камерная обработка деталей типа дисков и кулачков / В. А. Скрябин. – DOI [10.15507/0236-2910.026.201604.475-489](https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.475-489) // Вестник Мордовского университета. – 2016. – Т. 26, № 4. – С. 475–489. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles-en/65-16-5/454-10-15507-0236-2910-026-201604-05> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

Поступила 11.06.2020; принята к публикации 20.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440000, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, Researcher ID: R-2385-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Libby Ch.C. Sonic Riveting of Aircraft Aluminum Alloys. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1969; 16(3):117-125. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/T-SU.1969.29513>
2. Kozochkin M.P., Solis-Pinargote N.V. [Ultrasonic Blade Vibration Chip Forming Features]. *Mashinostroitel = Mechanical Engineer*. 2011; (2):29-35. (In Russ.)
3. Astashev V.K., Andrianov N.A., Kozochkin M.P., et al. On the Implementation of Ultrasonic Technology. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2009; (6):52-58. Available at: <http://naukarus.com/k-realizatsii-avtoezonansnoy-ultrazvukovoy-tehnologii> (accessed 29.10.2020). (In Russ.)
4. Solis N.W., Kozochkin M.P. Definition of the Shear Angle of Chip at Ultrasonic Vibration Turning by Means of High Speed Video Camera. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Researches*. 2010; (3):60-65. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-ugla-sdviga-struzhki-pri-ultrazvukovom-tochenii-s-pomoschyu-vysokoskorostnoy-videoseмки> (accessed 29.10.2020). (In Russ.)
5. Astashev V.K. [About Nonlinear Dynamics of Ultrasonic Technological Processes and Systems]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya = Science and Technology Development Bulletin*. 2007; (2):18-25. Available at: <http://www.vnt.ru/ftpgetfile.php?id=29> (accessed 29.10.2020). (In Russ.)
6. Astashev V.K., Andrianov N.A., Kozochkin M.P., et al. On the Implementation of Ultrasonic Technology. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2009; 38(6):566-571. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618809060089>

7. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications. Berlin: Springer; 2007. 332 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72061-4>
8. Gubbels G.P.H. Diamond Turning of Glassy Polymers. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven; 2006. 222 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.6100/IR613637>
9. Shamoto E., Suzuki N., Hino R. Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model. *CIRP Annals*. 2008; 57(1):57-60. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.073>
10. Moriwaki T., Suzuki H., Mizugaki J., et al. Ultraprecision Cutting of Molybdenum by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. In: Proceedings of 19th Annual Meeting, American Society for Precision Engineering (ASPE, 2004). Orlando; 2004. Pp. 82-92. Available at: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN055387370/Ultrprecision-Cutting-of-Molybdenum-by-Ultrasonic/> (accessed 29.10.2020). (In Eng.)
11. Suzuki N., Nakamura A., Shamoto E., et al. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. In: MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (19-22 Oct. 2003). Nagoya: IEEE; 2003. Pp. 125-135. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
12. Skryabin V.A., Kramcheninov I.K. Installation Design Capacity for Finish Treatment of Complex Profile Medium Size Parts by Unsupported Abrasive. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(4):607-619. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.607-619>
13. Skryabin V.A. The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):552-561. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>
14. Skryabin V.A. Features of Calculating Kinematic and Roughness Parameters at Abrasive Finishing of Shut-Off Surfaces of Gate Valve Bodies Connecting Pipes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):546-559. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559>
15. Skryabin V.A. Chamber Treatment Process of Disks and Fists. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 26(4):475-489. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.475-489>

Received 11.06.2020; revised 20.09.2020; published online 30.12.2020

About the author:

Vladimir A. Skryabin, Professor of the Engineering Technology Chair, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440000, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: R-2385-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

The author has read and approved the final manuscript.