

УДК 621.9

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НАРЕЗАНИЯ И ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

© 2021 Н. Д. Папшева, О.М. Акушская

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 10.06.2021

Представлены результаты исследования влияния ультразвука на процессы нарезания зубчатых колес из труднообрабатываемых материалов - зубодолбление и зубошлифование. Показано, что с введением в зону обработки ультразвука происходит значительное снижение составляющей силы резания  $P_z$ , усадки стружки и высоты микронеровностей. Износ режущих зубьев с наложением ультразвуковых колебаний приобретает более стабильный характер, повышается работоспособность зубообрабатывающего инструмента.

*Ключевые слова:* зубодолбление, зубчатое колесо, ультразвук, сила резания, напряженно-деформированное состояние, микрогеометрия, износ, стойкость.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-18-23

### ВВЕДЕНИЕ

Технология изготовления во многом определяет качество и производительность обработки деталей. Поэтому новые перспективные технологии, основанные на использовании дополнительных источников энергии, к которым относится ультразвук, являются актуальными. Эффективное направление применения ультразвуковых колебаний - интенсификация процессов механической обработки [1-4]. При этом вместе с основными движениями присутствуют колебания ультразвуковой частоты.

Как известно, введение ультразвука при тчении приводит к улучшению эксплуатационных характеристик деталей. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование влияния ультразвука на основные показатели процессов зубодолбления и зубошлифования труднообрабатываемых материалов, при обработке которых применение ультразвука наиболее эффективно [5,6]. Важнейшим технологическим показателем, который определяет качество и точность обработки зубчатых колес является сила резания.

### МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены составляющие силы резания и схема работы долбяка.

Сила резания может быть определена на основе гипотезы о равенстве удельных работ пла-

стической деформации при резании и сжатии в условиях равных пластических деформаций[7]. Рассмотрим процесс резания как процесс пластического сжатия, который подчиняется политропической зависимости.

$$P_0 h_0^m = P h^m \quad (1)$$

или

$$P = P_0 \left( \frac{h_0}{h} \right)^m, \quad (2)$$

где  $P_0$  – начальная нагрузка при сжатии образца высотой  $h_0$ ,  $P$  – текущая нагрузка, возрастающая с уменьшением высоты  $h$  (рис.2).

Принимаем  $P_0 = \sigma_0 f_0$  и  $P = \sigma f$ , где  $f_0$  и  $f$  – первоначальная и текущая площади образца,  $\sigma_0$  – условный предел текучести,  $\sigma$  – предел текучести при определенной степени сжатия.

После преобразования получим

$$\sigma = \sigma_0 \left( \frac{h_0}{h} \right)^n, \quad (3)$$

где  $n$  - показатель политропы сжатия, характеризующей склонность испытуемого материала к упрочнению,  $n = m - 1$ .

На рис. 3 в двойных логарифмических координатах представлена кривая политропической зависимости при сжатии.

$$\text{Итак, } P = \sigma f = \sigma_0 \left( \frac{h_0}{h} \right)^n f. \quad (4)$$

Принимая нормальную силу резания  $P_N$  при площади среза  $f = ba = ts$ , эквивалентной силе  $P$ , сжимающей образец с такой же площадью поперечного сечения при одинаковой усадке  $k_1$ ,

Папшева Нина Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры ТМСИ ФГБОУ.

E-mail: ninarap50@gmail.com

Акушская Ольга Мордуховна, старший преподаватель кафедры ТМСИ. E-mail: olgaaku@gmail.com

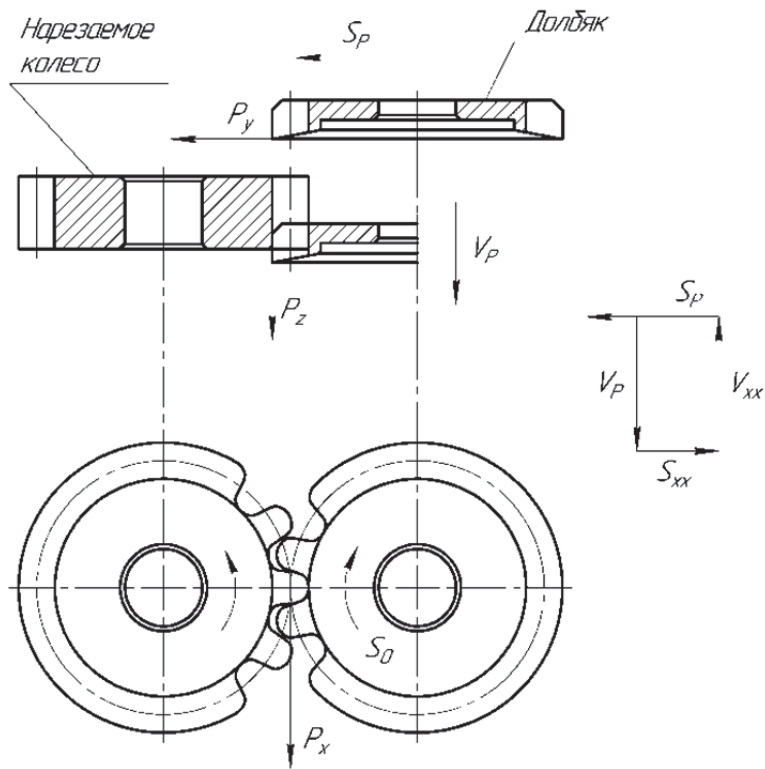


Рис. 1. Силы резания и схема работы долбяка

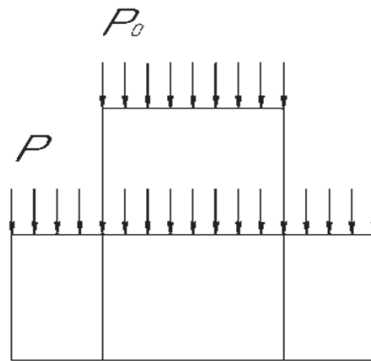


Рис. 2. Схема нагружения образца

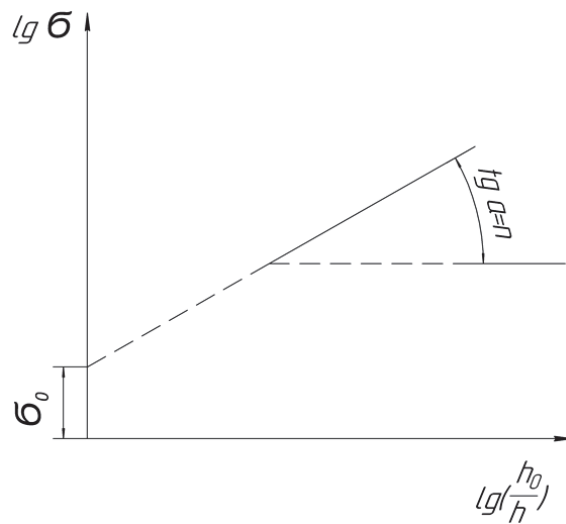


Рис. 3. Кривая политропической зависимости

равной  $a_1/a=h_0/h$  получим выражение для  $P_z$  при резании сплава ВКС-4 с ультразвуком

$$P_z = \sigma_0 t s k_1^m . \quad (5)$$

При зубодолблении среднее суммарное усилие резания, действующее на долбяк, зависит от площади сечения стружки и давления резания  $p$ .

$$\sum P_{zcp} = \sum F_{cp} p , \quad (6)$$

где  $\Sigma F_{cp}$  – среднее сечение стружки, получаемое от всех зубьев, работающих одновременно.

$$\sum F_{cp} = 0,475m^2 \frac{S_{kp}}{Z_{заз}^{0,09}} , \quad (7)$$

где  $S_{kp}$  – круговая подача,  $Z_{заз}$  – число нарезаемых зубьев.

Для случая ультразвукового зубодолбления  $\Sigma P_{zcpuz} = \Sigma F_{cp} p_{uz}$ .

Расчеты показали, что

$$\Sigma P_{zcpuz} = 400 \text{ Н}, \quad \Sigma P_{zcp} = 650 \text{ Н}.$$

Таким образом, введение ультразвука в зону резания привело к снижению среднего суммарного усилия на 38%.

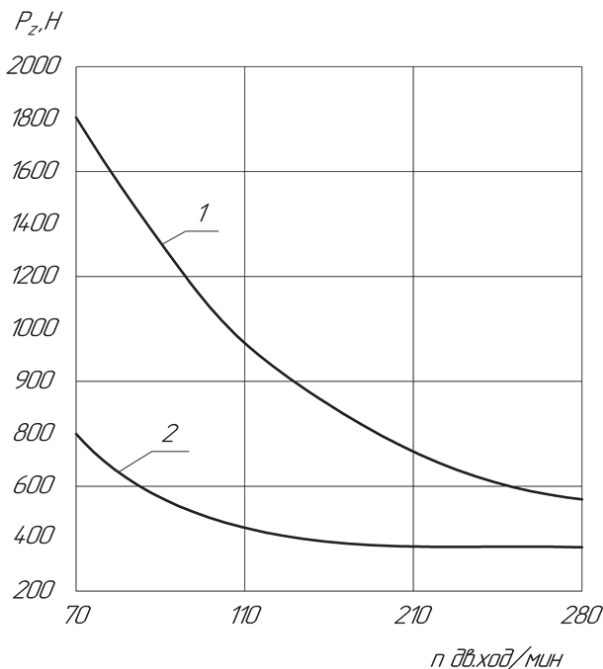
Физическую природу этого явления можно объяснить с позиций теории дислокаций как результат воздействия ультразвука на дислокационный механизм пластической деформации, в частности, повышения подвижности дислокаций и увеличении числа плоскостей скольжения. Поэтому отмеченная тенденция к снижению сил резания по-разному проявляется при ультразвуковом резании материалов различной кристаллической и дислокационной структурой. Различная эффективность ультразвука не является случайной, а отражает сложный механизм эволюции субструктуры при локальном поглощении ультразвуковой энергии.

Исследования проводили при обработке шестерен из сплава ВКС-4 (13ХЗНВМ2Ф-Ш) долбяками из быстрорежущей стали Р6М5 ( $\alpha=6^\circ$ ,  $\gamma=5^\circ$ ).

Таким образом, предложенная методика сравнительного анализа сил резания при обычном и ультразвуковом зубодолблении позволяет не только с достаточной точностью оценивать средние значения сил резания, но и выявить значительное их снижение при воздействии ультразвука.

Результаты исследования позволили установить, что при ультразвуковом зубодолблении составляющая  $P_z$  уменьшается в 1,5...2 раза. Причем с изменением подачи с 0,16 до 0,25 мм/дв. ход минимальное значение  $P_z$  снизилось с 650 до 350 Н. Изменение амплитуды колебаний  $\xi$  от 0 до 10 мкм приводит к снижению составляющей силы резания от 1800 Н до 800 Н (рис. 4).

При абразивной обработке с применением ультразвука формообразование происходит в результате массового микрорезания множеством абразивных зерен [7]. Моделированием

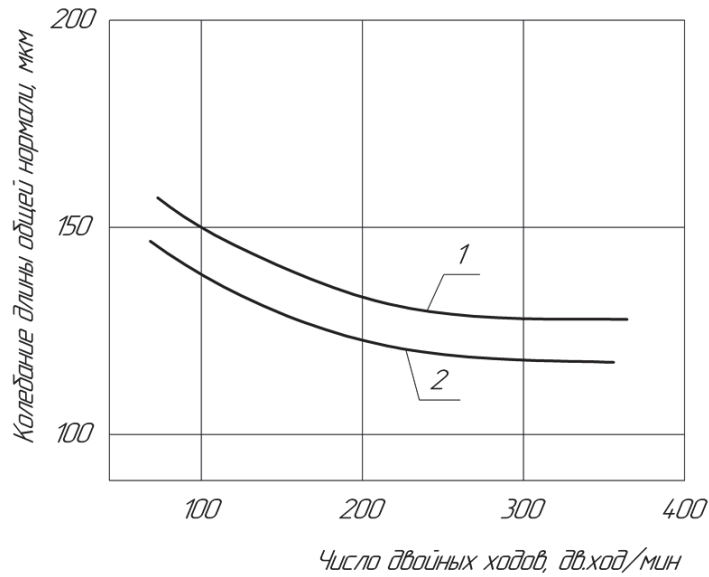


**Рис. 4.** Зависимость составляющей силы резания от числа двойных ходов  $S=0,16$  мм/дв.ход:  
1 – обработка без ультразвука,  
2 – обработка с ультразвуком

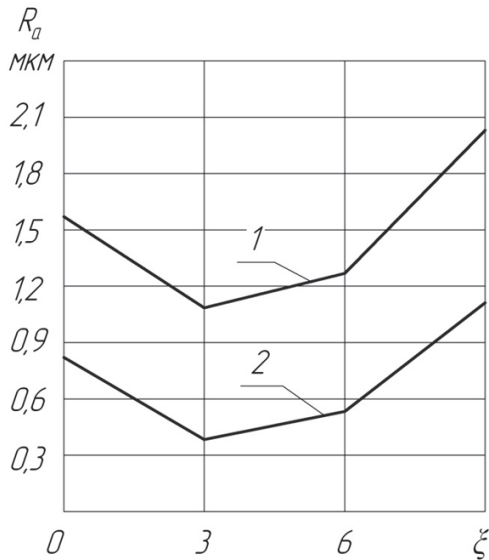
процесса установлено, что при введении в зону резания тангенциальных колебаний составляющая силы резания  $P_z$  снижается в 1,2...1,5 раза. Это можно объяснить изменением механических свойств обрабатываемого материала, в частности, изменением его твердости.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало хорошую сходимость результатов. Снижение сил при ультразвуковом резании отражает общую закономерность воздействия ультразвука на процессы пластического формообразования, одним из проявлений которой является снижение сопротивления пластической деформации связанное с изменением механических свойств материала в ультразвуковом поле. Эта особенность ультразвукового резания оказывает положительное влияние на основные физико-технологические показатели процесса, в том числе на работоспособность режущего инструмента, качество поверхностного слоя, точность обработки. В результате происходит снижение накопленной погрешности окружного шага в 1,4 раза, уменьшение колебаний длины общей нормали не 15-20%, повышение плавности зацепления (рис. 5).

Исследования микрогеометрии обработанной поверхности при обычном и ультразвуковом шлифовании позволили установить, что в зависимости от режимов резания применение ультразвука позволяет снизить величину  $R_a$  с 0,74 мкм до 0,5 мкм (рис.6). Это можно объяснить тем, что в зоне резания изменяется на-



**Рис. 5.** Влияние числа двойных ходов на длину общей нормали  $S=0.25$ .мм/дв.ход:  
1 – обычное резание, 2 – резание с ультразвуком



**Рис. 6.** Влияние ультразвуковых колебаний на шероховатость обработанной поверхности:  
1. Зубодолбление ВКС-4,  $m=1$ ,  $z=30$ ,  $v=40$  м/мин,  $\xi=4$  мкм;  $f=22$ кГц;  
2. Зубошлифование ВКС-4,  $m=1$ ,  $z=30$ ,  $v=30$  м/с,  $\xi=4$  мкм;  $f=22$ кГц

пряженно-деформированное состояние, отсутствует застойная зона и наростообразование на рабочих поверхностях инструмента [7, 8].

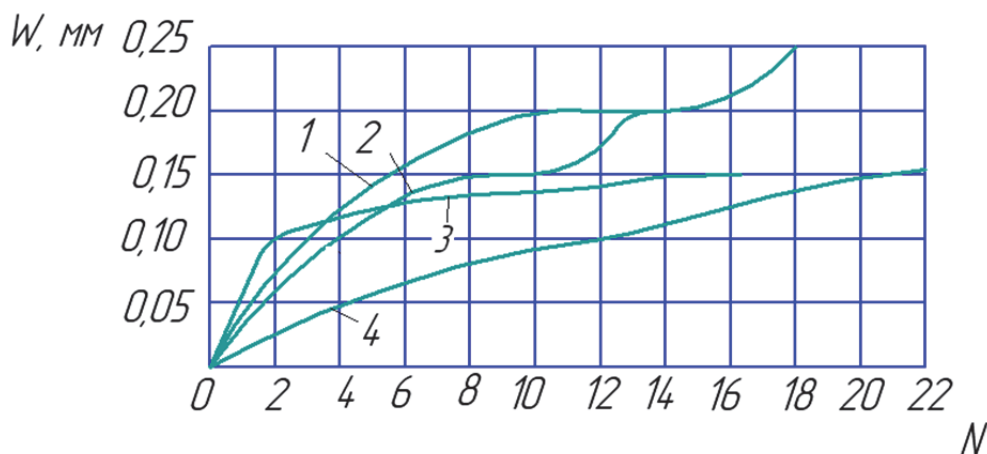
Как известно, особенностью зубодолбления является переменная для каждого рабочего хода толщина срезаемого слоя [9]. При этом в резании участвуют различные участки режущей кромки, которые отличаются конфигурацией и геометрическими параметрами. Основная масса металла срезается вершинной и входной боковой стороной профиля зуба долбяка. Наиболее толстый слой срезает вершина зуба. Участки

боковой режущей кромки выходной стороны, примыкающие к вершине зуба, срезают чрезвычайно тонкие слои. Так, при нарезании колес  $m=3$ мм и  $Z_k=30$  долбяком  $Z_0=28$  с подачей  $S_{кр}=0,22$  мм/дв.ход толщина слоя, срезаемого участками выходной стороны, прилегающими к вершине, не превышает 0,01 мм, что близко к величине скругления режущего лезвия.

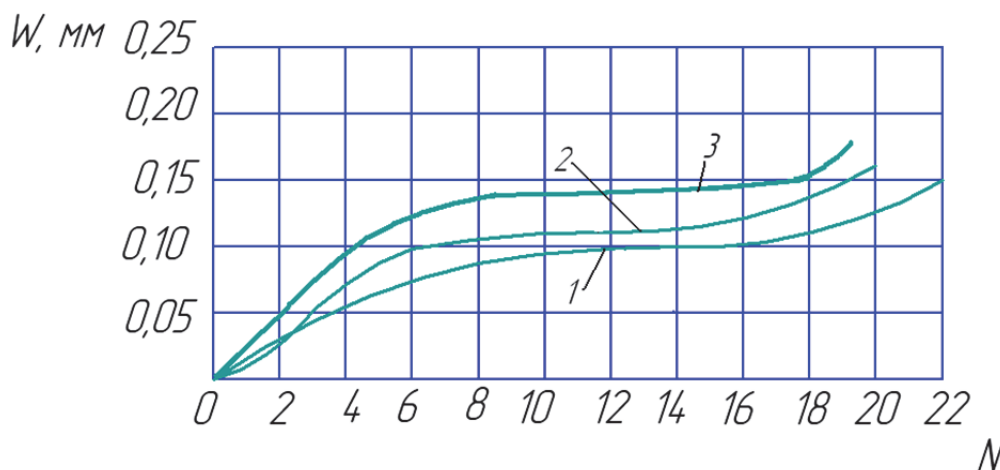
Поскольку вершина зуба долбяка работает в наиболее тяжелых термодинамических условиях, то в качестве критерия затупления долбяка принята величина износа по задней поверхности на вершине, равная  $h=0,3$  мм. Дальнейшее увеличение  $h$  приводит к сокращению общей продолжительности работы долбяка. Износ по задним боковым поверхностям меньше, чем на вершине на 20...35%. Введение ультразвука в зоны резания снижает максимальную величину износа на 20% при одновременном снижении разброса значений износа зубьев и стабилизации износа в целом. На рис.7 показана зависимость величины износа  $W$  режущих зубьев долбяка от количества нарезанных зубчатых колес  $N$  при обработке с наложением ультразвуковых колебаний и без. При этом происходит возрастание износа с увеличением  $N$ .

Скорость резания при зубодолблении также влияет на величину износа, при ее увеличении износ возрастает, что можно объяснить влиянием температурного фактора (рис. 8).

Как показали результаты стойкостных испытаний, при ультразвуковом резании основными причинами отказов режущего инструмента являются износ и разрушение инструмента в результате действия циклических напряжений. Следует, однако, отметить, что в условиях высокочастотного циклического взаимодействия инструмента и обрабатываемого изделия износ и локальное



**Рис. 7.** Зависимость величины износа  $W$  зубьев долбяка от количества нарезанных зубчатых колес  $N$ :  
 1, 2 – обработка без УЗК, 3, 4 – обработка с УЗК ( $\xi=4$  мкм;  $f=22$ кГц);  
 1, 3-  $V=17,5$  м/мин, 2, 4-  $V=35,4$  м/мин.  
 Обрабатываемый материал ВКС-4,  $S_{\text{круг}}=0,25$  мм/дв.ход



**Рис. 8.** Влияние скорости  $V$  на величину износа  $W$  зубьев долбяка:  
 1, 2, 3 – обработка с УЗК ( $\xi=4$  мкм;  $f=22$ кГц),  $S_{\text{круг}}=0,25$  мм/дв. ход,  
 обрабатываемый материал ВКС-4.  
 1- $V=28$  м/мин, 2-  $V=13,5$  м/мин, 3-  $V=35,5$  м/мин;

разрушение (микровыкрашивание) являются процессами взаимосвязанными и работоспособность инструмента определяется, как правило, совместным действием обоих факторов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с введением в зону обработки ультразвука происходит уменьшение составляющей силы резания  $P_z$  в 1,5...2 раза. В результате происходит снижение накопленной погрешности окружного шага в 1,4 раза, уменьшение колебаний длины общей нормали не 15-20%, повышение плавности зацепления. В зависимости от режимов резания применение ультразвука позволяет снизить шерохова-

тость обработанной поверхности  $R_a$  с 0,74 мкм до 0,5 мкм. Введение ультразвука в зоны резания снижает максимальную величину износа на 20% при одновременном снижении разброса значений износа зубьев и стабилизации износа в целом. Повышается работоспособность зубообрабатывающего инструмента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-технологические основы методов обработки / [А.П. Бабичев и др.]; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. -409 с.
2. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. -272 с.
3. Babichev A.P., Motrenko P.D. Fatigue Strength Increase

- during Vibrostriking of Parts using Multi-Contact Tool to account for Drilling Effect // Proceedings of the 7th International Conference on Debarring and Surface Finishing. University of California at Berkeley.- 2004. – Pp.461-463.
4. *Бабичев А.П.* Применение вибрационной технологии для повышения качества и эксплуатационных свойств деталей/ А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, Ф. А. Пастухов // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла: материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф./БГТУ. – Брянск, 2005. – С. 150-152.
  5. Геометрия резания материалов [Текст]: учеб. пособ./ А.И. Барботько. ТНТ, 2012. – Старый Оскол. 319 с.
  6. Формообразование и режущие инструменты. [Текст]: учеб. пособ./ А.И.Овсиенко -М. ФОРУМ, 2010. – 415 с.
  7. *Нерубай М.С., Калашиков В.В., Штриков Б.Л., Яреско С.И.* Физико-химические методы обработки и сборки. М.:Машиностроение-1.- 2005.-396 с.
  8. *Агапов С.И.* Determining the optimal amplitudes and directions of ultrasound vibrations in cutting small-module gears / Агапов С.И., Ткаченко И.Г. // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 2. – С. 141-143.
  9. *Федоров Ю.Н.* Определение толщины слоев металла, срезаемых периферийными режущими кромками зубьев инструмента при зубодолблении// Известия ВУЗов. М.: Машиностроение. 1980. – №7. – С. 133-136.

### INCREASING THE EFFICIENCY OF THE CUTTING AND PROCESSING OF GEARS

© 2021 N. D. Papsheva, O.M.Akushskaya

Samara State Technical University

The paper presents data on the influence of ultrasonic vibrations on the processes of cutting gears made of difficult-to-cut materials. It is shown that with the introduction of ultrasound into the processing zone, there is a significant decrease in the component of the cutting force  $P_z$ , chip shrinkage and the height of the micro-roughness. The wear of the cutting teeth with the imposition of ultrasonic vibrations becomes more stable, and the efficiency of the tooth-working tool increases.

*Key words:* gear wheel processing, gear, ultrasound, cutting force, stress-strain state, microgeometry, wear, durability.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-18-23