

УДК 621.9

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/tempp/1110.html>

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ

А.Е. Образцов¹obrazcow2@mail.ru
SPIN-код: 8338-4628**А.С. Пискарев²**tpdla-zl@mail.ru
SPIN-код: 4459-2280¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Традиционные методы механической обработки сопряжены с рядом фундаментальных технологических ограничений. К ним относятся значительное тепловыделение в зоне резания, приводящее к повышенному износу инструмента и термическим деформациям заготовки, развитие нежелательных автоколебаний (вибраций), негативно влияющих на точность и качество поверхности, а также проблемы, связанные с формированием и удалением стружки, способные вызывать повреждение обработанной поверхности. Применение методов вибрационного резания служит перспективным направлением для преодоления указанных ограничений. Придание режущему инструменту или заготовке контролируемых колебаний определенной частоты и амплитуды принципиально изменяет динамику процесса резания. Механизм воздействия вибраций заключается в периодическом нарушении непрерывного контакта инструмента со стружкой и заготовкой. Это приводит к ряду положительных эффектов: существенному снижению температуры в зоне резания за счет улучшения теплоотвода в периоды отсутствия контакта, эффективному демпфированию паразитных вибраций благодаря прерывистости процесса, облегчению слома и удаления стружки вследствие ее динамического разрушения на мелкие сегменты, а также к возможности увеличения глубины резания без роста негативных явлений. Совокупность указанных эффектов метода вибрационного резания позволяет достичь значительного улучшения технологических показателей процесса. В результате обеспечивается снижение шероховатости обработанной поверхности, минимизируется заусенцеобразование, повышается точность соблюдения геометрических параметров детали и, как следствие, существенно растет производительность механической обработки при одновременном повышении стойкости режущего инструмента.

Ключевые слова: ультразвуковая механическая обработка, ультразвуковая лезвийная обработка, вибрационная обработка, технологии вибрационного резания, ультразвуковое резание, прерывистое резание, осциллирующие движения инструмента

Введение. Конструкционные и функциональные материалы, применяемые в аэрокосмической отрасли, должны обладать низкой плотностью, термостабильностью, коррозионной стойкостью и иметь минимальное тепловое расши-

рение. Особенно критичны эти параметры для прецизионных оптических элементов (линз, зеркал, держателей), где стабильность размеров и отсутствие внутренних напряжений напрямую влияют на оптические характеристики. Анализ традиционной обработки как конструкционных сплавов, известных своей высокой удельной прочностью и легкостью [1, 2], так и оптических материалов и компонентов указывает на высокую трудоемкость их изготовления.

Реализация традиционных методов обработки конструкционных металлов [3] и оптических материалов (стекло, кристаллов) сопряжена с общими технологическими трудностями, среди которых неконтролируемая форма стружкообразования при высокопроизводительной обработке. Для оптики дополнительными проблемами являются риск образования микротрещин, царапин и высокая шероховатость, ухудшающая функциональные свойства поверхностей.

Повышение производительности и качества обработки широкого спектра материалов — от конструкционных сплавов до хрупких оптических — представляет собой актуальную задачу. Среди перспективных подходов выделяют вибрационное резание, и особенно в ультразвуковом диапазоне. Придание режущему инструменту контролируемых ультразвуковых колебаний позволяет не только существенно повысить производительность без ущерба для качества поверхности металлов, но и эффективно обрабатывать труднообрабатываемые материалы, включая оптические, открывая возможности для ранее недоступных операций.

Ультразвуковая вибрационная обработка — это процесс механической обработки, в котором режущему инструменту или заготовке сообщают ультразвуковые колебания. Основными операциями, при которых успешно применяют и исследуют данную технологию, являются токарная обработка, сверление и фрезерование [4], причем актуальность метода распространяется как на металлические детали, так и на прецизионные оптические компоненты, где требования к чистоте поверхности и геометрической точности исключительно высоки.

Ключевым фактором, определяющим достижение требуемых параметров поверхности, особенно при обработке хрупких оптических материалов, служит состояние режущего инструмента. В этом контексте особую значимость приобретает способность вибрационной обработки существенно повышать стойкость инструмента. В частности, обработка с применением колебаний позволяет значительно увеличить стойкость алмазного инструмента при резании хрупких материалов. Ярким подтверждением этому служат результаты испытаний [5], в ходе которых был обнаружен лишь незначительный износ боковых поверхностей алмазного инструмента после прохождения

59-метровой дистанции резания натриево-известкового стекла при использовании одноплоскостной вибрационной обработки (1D). Этот результат контрастирует с результатом обычной обработки данного материала, которая, как правило, вызывает высокий износ инструмента уже на коротком расстоянии резания.

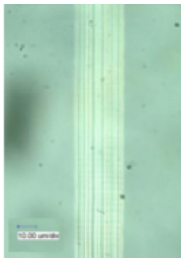
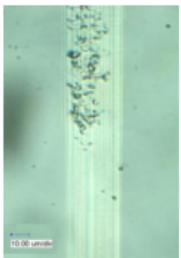
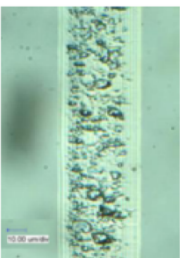
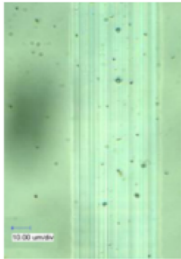
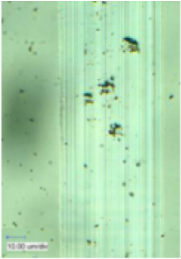
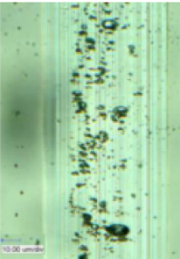
Опубликованные в [6] данные показывают, что износ инструмента во время обработки с применением колебаний в меньшей степени влияет на качество поверхности. При обычной механической обработке режущая кромка инструмента повреждается неравномерно, что сильнее влияет на качество поверхности.

Авторы работы [7] обнаружили, что применение колебаний в процессе резания увеличивает срок службы твердосплавных инструментов в 20 раз при обработке стеклокерамики. Используя твердосплавные инструменты для обработки нержавеющей стали, авторы [8] показали, что инструменты были значительно менее подвержены износу и повреждению режущей кромки при обработке с использованием вибраций по сравнению с обычной обработкой.

Производительность и качество обработки. При малой глубине резания многие хрупкие материалы обрабатываются как пластичные, образуя стружку благодаря пластическому течению и с минимальным образованием поверхностных трещин. На практике механическая обработка в пластичном режиме часто остается неэкономичной, поскольку критическая глубина резания составляет порядка 1 мкм или менее, что приводит к малой скорости съема материала и длительному времени обработки. Было доказано [9], что технология обработки с применением вибрации в несколько раз позволяет увеличить критическую глубину резания, при которой может быть достигнута пластичная обработка, что значительно повышает производительность при резании хрупких материалов. Например, в работе [9] описаны результаты обработки натриево-известкового стекла, при которой режущему инструменту придавали колебания в одном направлении (1D) и обеспечивали пластичную обработку на глубину 1,4 мкм, что почти в 7 раз превышает критическую глубину резания при обычной обработке. Совсем недавно авторы работы [10] применили технологию пластичной обработки стекла с глубиной 3 мкм. В работе [11] описана обработка кварцевого стекла и пластичное резание с помощью 1D-обработки, где шероховатость поверхности составляла $Ra = 100$ нм при глубине резания 2 мкм, в то время как при обычной обработке $Ra = 260$ нм.

Ниже приведена сравнительная таблица изменения вида канавки при обработке с применением (ультразвуковая обработка) и без использования вибраций (обычная обработка) в ультразвуковом диапазоне.

Обработанные канавки при обычной обработке и при обработке с применением вибрации

Вид обработки	Пластичное резание	Переходной процесс	Хрупкое разрушение
Обычная			
С применением колебаний			

Критическая толщина стружки в хрупких материалах указывает на предел глубины обработки, при котором образуются микротрещины. Если толщина стружки не превышает критического значения, то полученные повреждения в процессе резания будут удалены вместе со стружкой и поверхность останется гладкой. Меньшая средняя сила, прилагаемая инструментом при обработке с использованием вибрации, уменьшает глубину распространения трещин под обработанной поверхностью, другими словами, увеличивает значение критической толщины стружки. Хрупкие материалы можно рассматривать как имеющие плоскость скольжения, обеспечивающую пластическое течение, и плоскость, связанную с разрушением. Чтобы добиться пластичного резания, необходимо обеспечить напряжение, достаточное для того, чтобы вызвать пластическую податливость, но не превышающее значения, вызывающего скол. Благодаря меньшим силам, прилагаемым инструментом, можно обрабатывать материал на большую глубину, сохраняя при этом напряжения в нужном диапазоне.

Сверхмалая глубина резания при точении высокоточной оптики обычно имеет порядок микрометров, а требуемый показатель шероховатости составляет всего несколько нанометров. При изготовлении крупногабаритных деталей применяют обработку с использованием вибрации для достижения высокой точности и уменьшения износа инструмента. При использовании

прецизионных алмазно-токарных станков обработка с вибрациями позволяет получать поверхности со среднеквадратичными значениями шероховатости в диапазоне 10...30 нм на расстояниях обработки от сотен до нескольких тысяч метров [11].

В работе [11] показано, что при обработке детали с одинаковой глубиной резания шероховатость поверхности уменьшилась примерно на 40 % при использовании 1D-обработки и на 95 % при использовании колебательных движений в двух направлениях (2D). Эти примеры иллюстрируют способность обработки с применением вибрации значительно улучшать качество поверхности по сравнению с обычной обработкой в широком диапазоне типов инструментов, обрабатываемых материалов и глубины резания. Этим улучшениям способствуют несколько факторов. Меньшая сила, прикладываемая к инструменту, приводит к более равномерному образованию стружки и меньшим колебаниям инструмента в направлении глубины резания. Снижение износа инструмента способствует тому, что в процессе резания остается меньше частиц, вызывающих вторичные повреждения. Также показано, что применение данной обработки подавляет вибрацию в процессе резания.

Качество поверхности, полученной традиционным способом (без колебаний), показан на рис. 1, *а*. Видно, что с увеличением глубины резания на дне канавки быстро появилось множество трещин и углублений. При обработке с применением колебаний площадь гладкой поверхности на каждой канавке, образованной в результате пластической деформации, была намного больше, чем при использовании обычной обработки, как показано на рис. 1, *б-д*. Кроме того, в области перехода от пластичного к хрупкому разрушению плотность трещин и других дефектов на поверхности, полученных с помощью ультразвуковой обработки, было значительно ниже, чем при использовании обычной обработки [12].

Стружка. Во время обработки микроканавок на поверхности кремния образовавшиеся стружки казались непрерывными, цельными и неразрывными. При рассмотрении стружки в электронный микроскоп обнаружилось, что часть стружки не была полностью непрерывной и отличалась от макроизображения стружки, показанного на рис. 2. Ломкость стружки может быть вызвана прерыванием процесса резания при обработке с применением вибрации [12].

При движении режущего инструмента большое количество стружки скапливалось в виде расслоенных линий, из-за чего они казались непрерывными (рис. 3, *а*). Как показано на рис. 3, *б*, было обнаружено, что стружка, полученная из канавки, обработанной с глубиной резания 300 нм и амплитудой колебаний 480 нм, отличается от стружки из других канавок. В данном

случае критическая толщина недеформированной стружки, составляющая 380 нм, была определена на основе соотношения между критической толщиной недеформированной стружки и амплитудой вибрации. Таким образом, было объяснено, что стружка при каждом цикле вибрации не могла сохранять линейную целостность и расслаивалась на тонкие кусочки, когда максимальная толщина недеформированной стружки приближалась к критическому значению. Однако образование стружки не оказывало негативного воздействия на чистоту поверхности канавки [12].

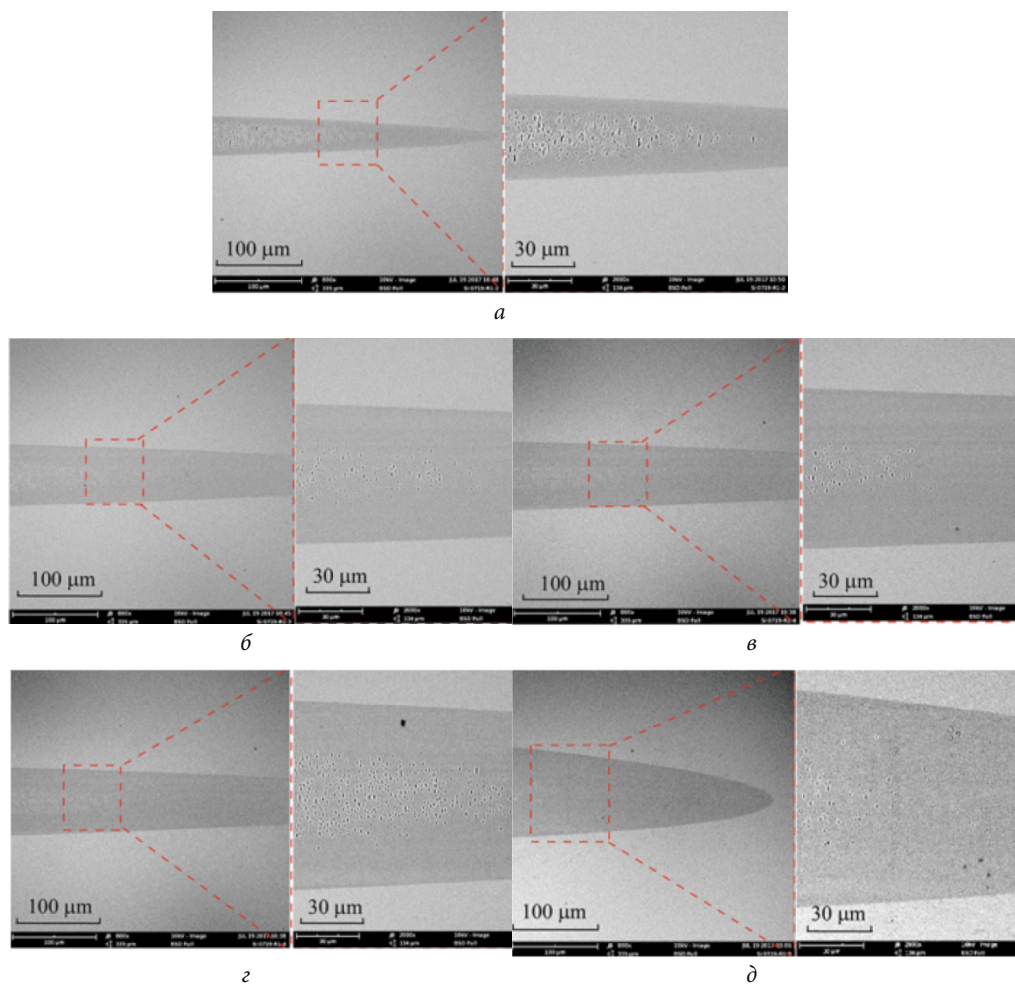


Рис. 1. Текстура канавок при различных амплитудах вибрации A (скорость резания $V_c = 200$ мм/мин, критическая глубина резания d_c), полученная на электронном микроскопе [12]:

a — $A = 0$, $d_c = 120$ нм; $б$ — $A = 590$ нм, $d_c = 400$ нм; $в$ — $A = 870$ нм, $d_c = 630$ нм;

$з$ — $A = 1026$ нм, $d_c = 750$ нм; $д$ — $A = 1700$ нм, $d_c = 1030$ нм

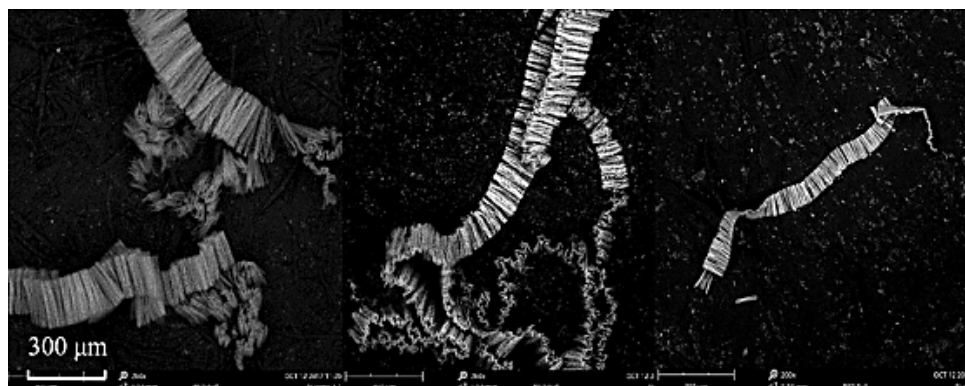


Рис. 2. Текстура стружки, наблюдаемая в электронный микроскоп

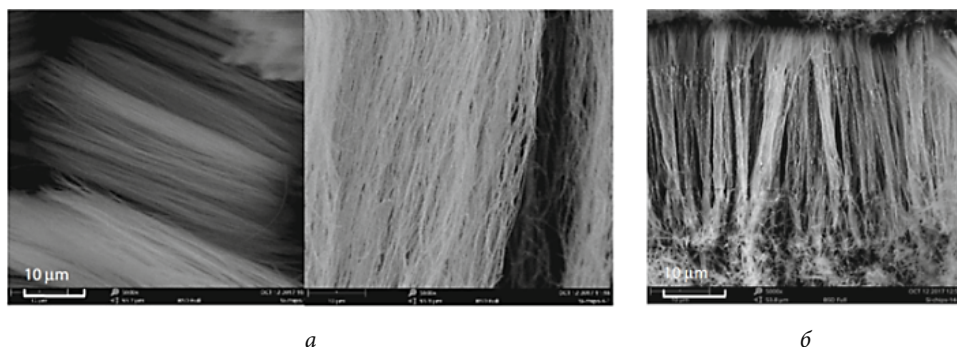


Рис. 3. Текстура стружки, наблюдаемая в электронный микроскоп при высоком разрешении

Авторы работы [13] обнаружили, что при пластичной обработке кремния без использования вибрации образуются как аморфное, так и поликристаллическое строение стружки, но при обработке с использованием вибрации наблюдается только поликристаллическая структура. Исследователи в ходе экспериментов обнаружили, что под вдавленной поверхностью образуется только аморфный кремний. Было установлено, что сила резания при обработке с помощью вибрации ниже, чем при обычной обработке, как показано в работе [14], а скорость деформации при формировании стружки была слишком низкой для получения аморфного кремния.

Толщина образующейся стружки значительно уменьшается даже при воздействии на режущий инструмент вибрации очень низкой частоты (0,5 Гц) по сравнению с обычной обработкой [15].

Применение вибраций режущей кромки в процессе резания способствует уменьшению силы по сравнению с обычной обработкой более чем на 20 %, позволяет продлить срок службы инструмента при обработке стеклокерамики примерно в 20 раз и увеличить критическую глубину резания в 7 раз. Обработка с использованием вибрационного резания, помимо вышеперечисленных преимуществ, способствует уменьшению шероховатости Ra при глубине резания 2 мкм с 260 до 100 нм, что позволяет уменьшить количество применяемого технологического оборудования, сократить трудозатраты и увеличить производительность.

Заключение. Применение вибраций в процессе формообразования позволяет улучшить качество поверхности, повысить производительность процесса обработки, уменьшить средние силы резания, увеличить срок службы инструмента, улучшить условия удаления стружки.

Повышение амплитуды и частоты вибрации при резании позволяет увеличить критическую толщину удаляемой стружки, что способствует повышению производительности процесса обработки.

Применение ультразвуковой вибрации позволяет не только увеличить максимальную глубину резания, но и сделать переход от пластичной обработки к хрупкому разрушению более плавным, что уменьшает вероятность порчи детали.

Литература

- [1] Peters M., Kumpfert J., Ward C. H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications. Titanium and Titanium Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2003, vol. 5, no. 6, pp. 419–427. <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>
- [2] Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. *Nippon STEEL SUMITOMO Met. Tech. Rep.*, 2014, vol. 106, pp. 22–27.
- [3] Campbell F.C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. New York, Butterworth-Heinemann Publication, Elsevier Science, 2006.
- [4] Xue-Hui Shen, Jian-Hua Zhang, Hua Li. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 63, pp. 41–49. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3882-5>
- [5] Moriwaki T., Shamoto E., Inoue K. Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1992, vol. 41, pp. 141–144. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61171-8](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61171-8)
- [6] Suzuki N., Nakamura A., Shamoto Eiji. Ultraprecision micromachining of hardened steel by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. *Proceedings of 2003*

- International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan, IEEE Xplore, 2003, pp. 221–226.
<https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
- [7] Weber H., Herberger J., Pilz R. Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool. *Annals of the CIRP*, 1984, vol. 33, pp. 85–87.
- [8] Xiao M., Karube Shu, Soutome T., Sato K. Analysis of chatter suppression in vibration cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, pp. 1677–1685.
- [9] Klocke F., Rubenach O. Ultrasonic-assisted diamond turning of glass and steel. *Industrial Diamond Review*, 2000, vol. 60, pp. 227–239.
- [10] Weber H., Herberger J., Pilz R. Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool. *Annals of the CIRP*, 1984, vol. 33, pp. 85–87.
- [11] Kim J.D., Choi I.H. Micro surface phenomena of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 68, pp. 89–98.
- [12] Jun-Yun Chen, Tian-Ye Jin, Xi-Chun Luo. Key machining characteristics in ultrasonic vibration cutting of single crystal silicon for micro grooves. *Advances in Manufacturing*, 2019, vol. 7, pp. 303–314.
- [13] Klopstein M., Ghisleni R., Lucca D. Surface characteristics of micro-ultrasonically machined (100) silicon. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, pp. 473–476.
- [14] Zhang J., Cui T., Ge C. et al. Review of micro/nano machining by utilizing elliptical vibration cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 106, pp. 109–126.
- [15] Xin Quan Zhang, Shamsul Arefin, Senthil Kumar, Kui Liu. Elastic and plastic chip deformation mechanism in 1D vibration-assisted metal cutting. *4th CIRP Conference on Surface Integrity*, 2018, vol. 71, pp. 309–312.

Поступила в редакцию 20.11.2025

Образцов Александр Евгеньевич — аспирант кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Пискарев Александр Сергеевич — заведующий лабораторией, преподаватель кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Утенков Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: utencov@bmstu.ru. SPIN-код: 7606-6797.

Научный руководитель — Кузнецов Павел Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Системное моделирование и автоматизированное проектирование», «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация. E-mail: profpol@rambler.ru. SPIN-код: 9216-7801.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Образцов А.Е., Пискарев А.С. Повышение производительности механической обработки за счет применения вибрационного резания. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 03 (104). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/tempp/1110.html>

INCREASED MACHINING PERFORMANCE THROUGH THE USE OF VIBRATORY CUTTING

A.E. Obraztsov¹

obrazcow2@mail.ru
SPIN-code: 8338-4628

A.S. Piskarev²

tpdla-zl@mail.ru
SPIN-code: 4459-2280

¹ *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

Traditional machining methods are associated with a number of fundamental technological limitations. These include significant heat generation in the cutting area, leading to increased tool wear and thermal deformations of the workpiece, the development of undesirable self-oscillations (vibrations) that negatively affect the accuracy and quality of the surface, as well as problems associated with the formation and removal of chips that can cause damage to the treated surface. The use of vibration cutting methods offers a promising direction to overcome these limitations. Giving a cutting tool or workpiece controlled vibrations of a certain frequency and amplitude fundamentally changes dynamics of the cutting process. The mechanism of action of vibrations consists in the periodic disruption of the continuous contact of the tool with the chips and the workpiece. This leads to a number of positive effects: a significant decrease in the temperature in the cutting area due to improved heat dissipation during periods of absence of contact, effective damping of parasitic vibrations due to the intermittency of the process, easier chip breaking and removal due to its dynamic destruction into small segments, as well as the possibility of increasing the cutting depth without increasing negative phenomena. The combination of these effects of the vibration cutting method makes it possible to achieve significant improvements in the technological parameters of the process. As a result, the roughness of the treated surface is reduced, burr formation is minimized, the accuracy of observing the geometric parameters of the part is increased and, as a result, a significant increase in machining performance while increasing the durability of the cutting tool.

Keywords: ultrasonic vibration processing, ultrasonic blade machining, vibration-assisted cutting, vibration-assisted cutting technology, ultrasonic machining, interrupted cutting, oscillatory cutting

Received 20.11.2025

Obraztsov A.E. — Postgraduate, Department of Metal-Cutting Machine Tools, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Piskarev A.S. — Head of the Laboratory, lecturer of the Department of Technology of Production and Operation of Aircraft Engines, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Utenkov V.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metal-Cutting Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: utencov@bmstu.ru. SPIN-code: 7606-6797.

Scientific advisor — Kuznetsov P.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of System Modeling and Computer-aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation. E-mail: profpol@rambler.ru. SPIN-code: 9216-7801.

Please cite this article in English as:

Obraztsov A.E., Piskarev A.S. Increased machining performance through the use of vibratory cutting. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 03 (104). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/tempp/1110.html>