

УДК 621.9

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/tempp/1097.html>

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВИБРАЦИОННЫМ РЕЗАНИЕМ

А.Е. Образцов¹

obrazcow2@mail.ru
SPIN-код: 8338-4628

А.С. Пискарев²

tpdla-zl@mail.ru
SPIN-код: 4459-2280

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

Обработка хрупких материалов вызывает сложности из-за их склонности к образованию трещин во время резания. Обеспечить высокопроизводительный процесс обработки довольно трудно, поскольку глубина резания составляет несколько микрометров, а для анизотропных монокристаллов, таких как KDP и DKDP, менее одного микрометра. В статье представлен метод повышения производительности и качества обработки поверхностей хрупких материалов с применением вибрационного резания без образования поверхностных и подповерхностных трещин. Рассмотрены основные применяемые методы вибрационной обработки, к которым относятся 1D (виброперемещение в одном направлении) и 2D (виброперемещение в двух направлениях) вибрация, их основные преимущества и недостатки. Данный метод рационально применять при обработке труднообрабатываемых и хрупких материалов.

Ключевые слова: вибрационное резание, обработка с применением вибрации, обработка хрупких материалов, методы вибрационной обработки, стружкообразование, осциллирующие движения

Введение. Некоторые материалы, такие как керамика, кремний, трудно поддаются обработке традиционными методами резания по причине их высокой твердости и хрупкости [1]. При обычном точении в хрупких материалах накапливаются микротрещины, которые после преодоления определенного значения приводят к возникновению сколов, разломов. В результате этого деталь приходит в негодность. Чтобы предотвратить разрушение, вызванное трещинами, хрупкий материал следует подвергать механической обработке в пластичном режиме. Такой метод позволяет достичь высокого качества обработки практически без последующей обработки. Концепция механической обработки в пластичном режиме возникла как результат испытаний хрупкого материала на вдавливание, которые показали, что хрупкость зависит от размера вдавливания [2]. Исследователи выдвинули гипотезу

тезу, что если при механической обработке толщина недеформированной стружки меньше определенного критического предела, материал в зоне резания подвергается сдвигу, подобному сдвигу металла, благодаря микроскопической пластичности.

Пластичное резание достигается при глубине резания несколько микрометров, в некоторых случаях — долей микрометра. При такой глубине деталь может обрабатываться несколько часов. Во второй половине прошлого века был разработан метод виброрезания в одном направлении, после, с развитием технологий, применили эллиптическую траекторию вибрационного резания (в двух направлениях). В результате скорость обработки повысилась, а качество получаемой поверхности не изменилось.

Вибрационное резание. Обработка с применением вибрации — это процесс обработки, при котором в обычный процесс резания вводится внешняя энергия, действующая на инструмент или заготовку. Таким образом создаются вибрации с малой амплитудой [3].

В процессе резания вибрация воздействует на режущий инструмент или заготовку непрерывно с заданной частотой, создавая прерывистое движение резания с циклическим контактом инструмента и заготовки. Применение вибрации с регулируемой частотой и амплитудой в процессе обработки приводит к улучшению качества поверхности, снижению виброударов, уменьшению сил и износа инструмента [4].

Для улучшения качества поверхности и снижения средних сил резания труднообрабатываемых материалов все чаще стали применять вибрационное резание. Основываясь на особенностях этого процесса обработки, в последние годы начали изготавливать микротекстурированные поверхности, что позволило расширить область применения.

Проблема обработки хрупких материалов связана с их чувствительностью к изменению глубины резания. Например, поверхность без трещин при обычном резании кремния может быть получена только в пластичной области при чрезвычайно малой толщине недеформированной стружки, поскольку имеется низкая вязкость разрушения [5]. Если глубина резания резко возрастет на 5...10 мкм, то начинают образовываться микротрещины, которые портят поверхность детали.

Поскольку режущая поверхность инструмента в процессе обработки с применением вибраций периодически соприкасается с материалом заготовки/стружки и отделяется от него, упругая деформация и восстановление упругости будут происходить до и после пластической деформации в каждом цикле вибрационного резания. В месте контакта инструмента и заготовки напряжение в материале постепенно увеличивается, и энергия упругости по-

степенно накапливается до тех пор, пока не будет достигнут критический предел для начала пластической деформации.

Важным показателем, характеризующим точку перехода из пластичного в хрупкий режим обработки, служит критическая толщина недеформированной стружки, при которой энергия пластичного резания переходит в энергию хрупкого разрушения.

Исследователи [6] экспериментально продемонстрировали, что критическая толщина недеформированной стружки для перехода из пластичного в хрупкое состояние для хрупких материалов может быть значительно увеличена при использовании вибрационной обработки.

В зависимости от фазы и направления приложенной вибрации различают два типа обработки: в одном направлении 1D (т. е. обычное резание с использованием вибрации) и в двух направлениях 2D (т. е. эллиптическое резание с использованием вибрации). Обработка с вибрациями в трех плоскостях показала результат, сопоставимый с результатом 2D-обработки, но при этом усложняется сам процесс резания и теряется производительность, поскольку возникает ограничение в использованных частотах колебаний инструмента. Хотя по сравнению с 1D для обработки 2D требуется более сложная система создания вибрации, 2D может обеспечить высокую производительность резания при хорошей целостности поверхности, меньшей силе резания и износе инструмента. Для 2D уже экспериментально доказано, что толщина образующейся стружки в процессе обработки материала значительно уменьшается из-за обратного кинетического трения между режущей кромкой инструмента и образующейся стружкой.

Системы 1D используются как для прецизионной алмазной обработки поверхностей оптического качества, так и для традиционной обработки с глубиной резания до 0,5 мм [7]. Однако главный недостаток 1D-обработки — образование следов инструмента, остающихся в результате вибрации на обрабатываемой поверхности [8]. Отметим, что средняя осевая сила при использовании вибрации в одном направлении снижается до 20 % по сравнению с силой при обычной обработке [9]. Если дополнительно добавить вибрацию в другом направлении, то уменьшение становится еще больше (рис. 1).

При 2D-обработке средние силы меньше, чем при обычной. Снижение силы на инструменте служит результатом нескольких явлений, которые изменяют геометрию стружки, а также взаимодействие между режущей поверхностью инструмента и стружкой при ее удалении из заготовки. Основная причина снижения силы на инструменте связана с геометрией перемещения инструмента по эллиптической траектории. Для горизонтального эллипса

сила, прилагаемая инструментом, меньше, поскольку последовательная траектория движения приводит к образованию стружки, толщина которой превышает глубину резания при обычной механической обработке [11]. Когда траектория движения инструмента представляет собой круг или вертикальный эллипс, снижение силы на инструменте вызвано тем, что скорость инструмента превышает скорость стружки, что приводит к изменению направления силы трения и уменьшению силы упругости.

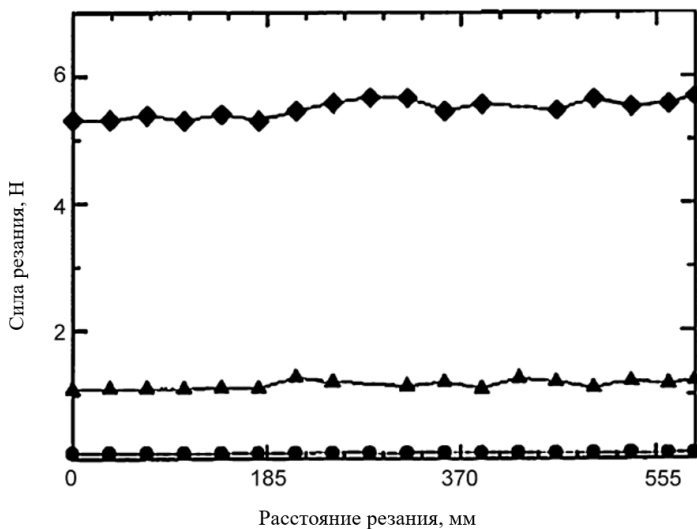


Рис. 1. Сравнение средней осевой силы:

- ▲ — при традиционном резании (обычное резание); ♦ — при резании с вибрацией в одном направлении (1D вибрационное резание); ● — при резании с вибрацией в двух направлениях (2D вибрационное резание) с частотой $f = 18,66$ кГц [10]

Ультразвуковая вибрационная обработка относится к частному случаю вибрационного резания. В основном применяется данная обработка, поскольку она обеспечивает меньшие средние силы, меньше коэффициент трения и улучшение качества поверхности по сравнению с низкочастотной обработкой [12]. Для кремниевых материалов критическая глубина резания, полученная с помощью ультразвуковой вибрационной обработки, намного больше, чем при использовании традиционного резания [13].

Поскольку кремний представляет собой типичный хрупкий материал, ультразвуковая вибрационная обработка служит многообещающим методом для достижения более высоких характеристик получаемой поверхности, чем традиционные методы. Высокочастотная ультразвуковая система 1D обладает более высокой номинальной скоростью резания и скоростью съема материала

ла, чем многие 2D/3D-системы. Однако лишь немногие исследователи применяли метод 1D для обработки поверхности кремния, поскольку его основной недостаток — это следы от инструмента, оставляемые вибрацией на обрабатываемой поверхности [8].

Ультразвуковая 2D/3D-обработка может обеспечивать меньшие силы резания и более тонкую стружку, что, как правило, считается более выгодным для сверхточного резания хрупких материалов, но частота колебаний ниже из-за более сложной конструкции и системы управления по сравнению с аналогичными характеристиками при ультразвуковой 1D-обработке. При резании с помощью вибрации максимальная номинальная скорость резания в основном ограничена скоростью вибрации инструмента, которая определяется самой высокой частотой вибрации и амплитудой колебаний системы. По сравнению с другими системами (2D/3D) система 1D, используемая в исследовании [8], имеет максимальную амплитуду вибрации, составляющую приблизительно 2 мкм вдоль номинального направления резания, и более высокую частоту вибрации, что позволило достичь более высокой номинальной скорости резания и удаления материала.

В рамках исследования [14] выполнена механическая обработка образцов титанового сплава при одинаковой глубине резания для трех случаев: традиционное резание (без вибрационного воздействия), резание с линейными колебаниями режущей кромки в одном направлении, резание с ортогональными колебаниями, формирующими эллиптическую траекторию инструмента. Последующая микроскопия обработанных поверхностей (рис. 2) выявила существенные различия в их качестве поверхности. При традиционном резании (рис. 2, а) наблюдается хаотичная адгезия частиц материала и образование борозд. Обработка с вибрацией в одном направлении (рис. 2, б) обеспечила устранение адгезии, однако сохранила периодический микрорельеф от следов инструмента. Напротив, эллиптическая вибрационная обработка (рис. 2, в) продемонстрировала минимальное тепловыделение в зоне резания и подавление паразитных колебаний инструмента вследствие существенного снижения силовых нагрузок, что обусловило формирование поверхности с наилучшим качеством.

Внешний вид стружки служит индикатором силовых и термических условий в зоне резания. При традиционной обработке (рис. 3, а) наблюдается ярко выраженная структура стружки с макроскопическими зазубринами, что свидетельствует о значительных циклических нагрузках и повышенной пластической деформации. Дополнительно фиксируются многочисленные микродефекты на контактной поверхности стружки, включая микротрещины и адгезионные наслоения, вызванные высоким трением и температурой.

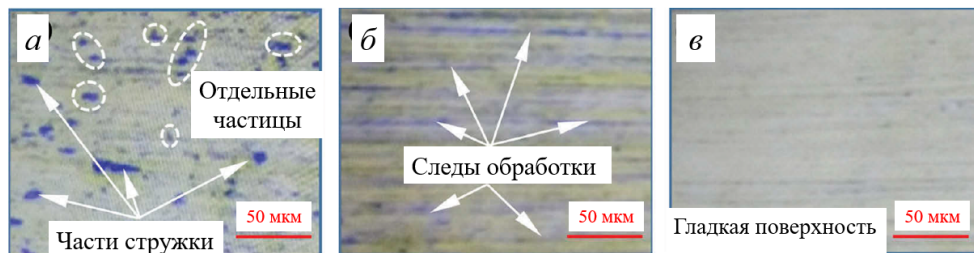


Рис. 2. Фотографии обработанных поверхностей [14]:

а — при традиционном резании; *б* — при резании с применением колебательного воздействия в одном направлении; *в* — при резании с применением колебательного воздействия в двух направлениях

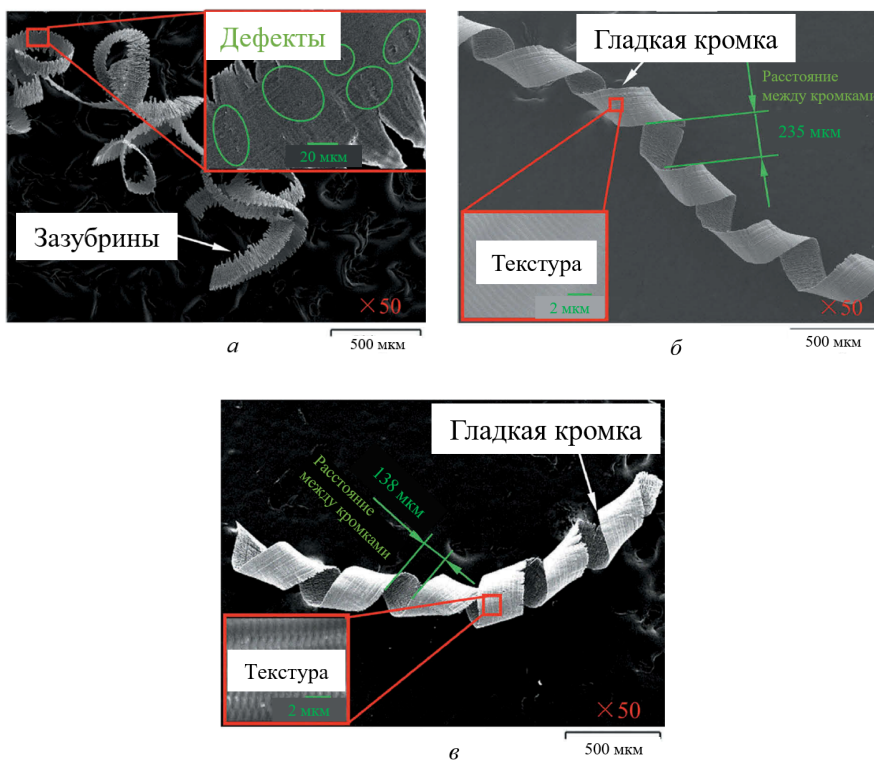


Рис. 3. Фотография, полученная на электронном микроскопе, где видно текстуру стружки [14]:

а — при традиционном резании; *б* — при резании с применением колебательного воздействия в одном направлении; *в* — при резании с применением колебательного воздействия в двух направлениях

Применение одномерных ультразвуковых колебаний (рис. 3, б) приводит к формированию стружки с гладкой поверхностью и отсутствием зазубрин. На контактной стороне проявляется периодическая текстура, соответствующая частоте вибрации. Стружка характеризуется регулярным спиральным скручиванием со средним шагом 235 мкм. Данная трансформация объясняется периодическим разрывом контакта «инструмент — заготовка», что снижает среднюю режущую силу на 25...40 % и температуру в зоне резания на 15...20 % за счет сокращения времени непрерывного взаимодействия за цикл колебаний.

В режиме двухмерных колебаний (рис. 3, в) достигается дальнейшие улучшения процесса резания. Радиус скручивания уменьшается на 30...50 %, а шаг спирали сокращается до 138 мкм. Механизм обусловлен микросдвиговой деформацией материала при эллиптическом движении инструмента, что снижает тангенциальные напряжения.

Качественное изменение структуры стружки при вибрационном воздействии прямо коррелирует с сокращением силовых и термических параметров. Периодическое отделение стружки от передней поверхности инструмента уменьшает зону пластического контакта, подавляя адгезию и образование дефектов. Снижение шага скручивания при эллиптической траектории относительно колебаний в одном направлении подтверждает повышение эффективности отвода тепла и снижение остаточных напряжений.

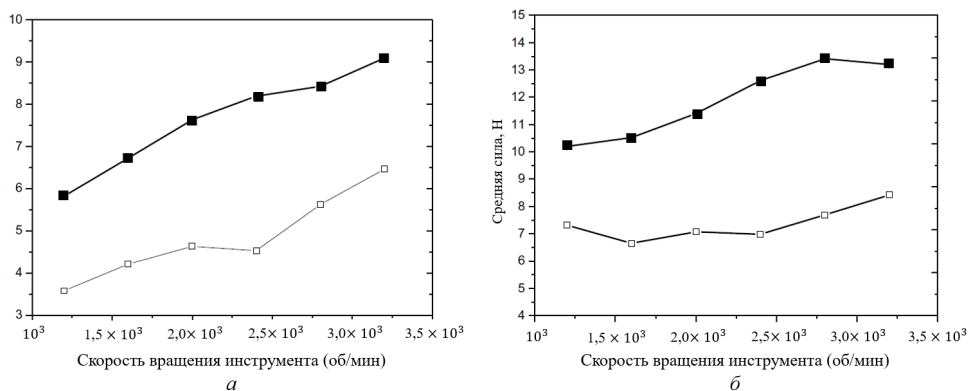


Рис. 4. Графики зависимости сил резания от скорости вращения шпинделя:

а — сила в радиальном направлении F_r ; б — сила в осевом направлении F_f
(■ — обычное резание; □ — резание с применением вибрации)

Сравнительные зависимости средних значений силы резания от частоты вращения шпинделя для традиционной и обработки с применением колебательных движений представлены на рис. 4. Установлено, что при увеличении скорости резания наблюдается рост как радиальной F_r , так и осевой F_f состав-

ляющих силы резания. При этом для вибрационной обработки фиксируется систематическое снижение абсолютных значений сил на 25...40 % во всем исследованном диапазоне скоростей [15].

Таким образом, внедрение колебательных режимов обеспечивает:

- улучшение качества поверхности;
- минимизацию глубины деформированного поверхностного слоя;
- трансформацию структуры стружки;
- подавление адгезионных явлений и устранение наростообразования;
- повышение стойкости инструмента за счет сокращения температурных и силовых нагрузок;
- повышение производительности обработки.

Заключение. Применение ультразвуковых технологий в процессах формообразования обеспечивает значительное улучшение технологических показателей:

- повышение качества поверхности за счет снижения шероховатости на 30...50 % и минимизации поверхностных дефектов (микротрещин, деформированного слоя);
- сокращение силовых нагрузок на 25...40 % и температуры в зоне резания на 15...20 %;
- увеличению ресурса инструмента на 70...120 % благодаря подавлению адгезионных механизма износа.

В контексте сверхточной обработки вибрационное воздействие обеспечивает контролируемое изменение структуры стружки:

- трансформирует структуру в квазинепрерывную;
- выполняет регулярное фрагментирование с уменьшением длины сегментов на 35...60 %;
- минимизирует адгезию фрагментов к обработанной поверхности.

Данные эффекты предотвращают поверхностные повреждения (микро-скалывания, борозды), снижая долю дефектных изделий на 40...65 %. Механизм основан на микросдвиговой деформации материала при периодическом разрыве контакта инструмент-заготовка, что обеспечивает динамическое сокращение остаточных напряжений.

Литература

- [1] Akbar F., Mativenga P.T., Sheikh M.A. An experimental and coupled thermos-mechanical finite element study of heat partition effects in machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, vol. 46, pp. 491–507.
<https://doi.org/10.1007/s00170-009-2117-5>

- [2] Zhang X.Q., Arif M., Liu K., Anantharajan S.K. A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, vol. 69, pp. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.03.006>
- [3] Chen W., Zheng L., Teng X., Yang K., Huo D. Cutting Mechanism Investigation in Vibration-Assisted Machining. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2018, vol. 1, pp. 268–276. <https://doi.org/10.1007/s41871-018-0031-x>
- [4] Zhang X.Q., Arefin S., Kumar S., Liu K. Elastic and plastic chip deformation mechanism in 1D vibration-assisted metal cutting. *4th CIRP Conference on Surface Integrity*, 2018, vol. 71, pp. 309–312. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.027>
- [5] Chavoshi S.Z., Goel S., Luo X. Influence of temperature on the anisotropic cutting behavior of single crystal silicon: A molecular dynamics simulation investigation. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 23, pp. 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.009>
- [6] 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. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(96\)02546-0](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(96)02546-0)
- [7] Wang X., Song C., Tong J., Li L., Wu M., Zhao B. Study on the influence of ultrasonic-assisted cutting on the surface quality of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 131, pp. 1989–2000. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2195027/v1>
- [8] Chen J.-Y., Jin T.-Y., Luo X.-C. Key machining characteristics in ultrasonic vibration cutting of single crystal silicon for micro grooves. *Advances in Manufacturing*, 2019, vol. 7, pp. 303–314. <https://doi.org/10.1007/s40436-019-00263-4>
- [9] Brehl D.E., Dow T.A. Review of vibration-assisted machining. *Precision Engineering*, 2008, vol. 32, pp. 153–172. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.08.003>
- [10] Ma C., Shamoto E., Moriwaki T. Study on the Thrust Cutting Force in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *Mater Sci Forum*, 2004, vol. 471, pp. 396–400. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.471-472.396>
- [11] Negishi N. *Elliptical vibration-assisted machining with single crystal diamond tools*. MS thesis, North Carolina State University, 2003.
- [12] Zhang X., Arif M., Liu K. A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 69, pp. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.03.006>
- [13] Zhu Z., To S., Xiao G. et al. Rotary spatial vibration-assisted diamond cutting of brittle materials. *Precision Engineering*, 2015, vol. 44, pp. 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.007>

- [14] Rongkai T., Xuesen Z., Shuo Z., Xicong Z. Study on ultra-precision processing of Ti-6Al-4V with different ultrasonic vibration-assisted cutting modes. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, № 34, pp. 1380–1388.
- [15] Zhang X.Q., Rahman M., Nath C. An analytical force model for orthogonal elliptical vibration cutting technique. *J. Manuf. Processes*, 2012, № 14, pp. 378–387.

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. SPIN-код: 7606-6797. E-mail: utencov@bmstu.ru

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

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Образцов А.Е., Пискарев А.С. Повышение качества обрабатываемой поверхности вибрационным резанием. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 02 (103). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/temp/1097.html>

IMPROVING THE QUALITY OF THE TREATED SURFACE BY VIBRATION ASSIST 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*

Processing of brittle materials is difficult due to their tendency to crack during cutting. It is difficult to obtain a high-performance machining process, since the cutting depth is several micrometers, and for anisotropic single crystals such as KDP and DKDP less than one micrometer. This article examines a way to improve the productivity and quality of surface treatment of brittle materials using vibration cutting without the formation of surface and subsurface cracks. The main vibration processing methods used are considered, which include 1D (vibration displacement in one direction) and 2D (vibration displacement in two directions) vibration, their main advantages and disadvantages. It is rational to use this method when processing difficult-to-process and brittle materials.

Keywords: vibration cutting, processing using vibration, processing of brittle materials, methods of vibration processing, chip formation during vibration cutting, oscillating movements, processing using oscillating movements, features of processing using oscillating movements

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 Department of Technology of Production and Operation of Aircraft Engines, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation.

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

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

Please cite this article in English as:

Obraztsov A.E., Piskarev A.S. Improving the quality of the treated surface by vibration assist cutting. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 02 (103). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/tempp/1097.html>