

УДК 621.9

## Повышение производительности механообработки при вибрационном резании

**А.Е. Образцов, В.М. Утенков, П.М. Кузнецов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Increasing the productivity of machining during vibration cutting

**A.E. Obraztsov, V.M. Utenkov, P.M. Kuznetsov**

Bauman Moscow State Technical University

Труднообрабатываемые материалы получили широкое применение в деталях ракетных двигателей, летательных и аэрокосмических аппаратов. Сплавы, имеющие в своем составе титан, являются сложно обрабатываемыми материалами. Они сочетают в себе высокую твердость и низкую теплопроводность, что приводит к ухудшению характеристик резания. При традиционном резании возникают проблемы, связанные с нагревом режущего инструмента до высокой температуры, с возникновением вибрации, образованием и удалением стружки из зоны резания. Использование вибрации режущего инструмента в процессе обработки позволяет снизить температуру в зоне резания и внешние вибрации, облегчить удаление стружки и уменьшить ее размеры, а также увеличить глубину резания. Вибрация режущего инструмента позволяет уменьшить шероховатость, убрать заусенцы, повысить точность получаемых размеров и производительность механообработки. Рассмотрена микроструктура поверхности, полученная с помощью интерферометра, при различных значениях частоты вращения инструмента. Показано влияние вибрации на формирование стружки.

**EDN:** YJUTYY, <https://elibrary/yjuty>**Ключевые слова:** вибрационное резание, обработка с применением вибрации, производительность механообработки, текстура стружки, вибрации в ультразвуковом диапазоне

Difficult-to-process materials have been widely used in the details of rocket engines, aircraft and aerospace vehicles. Alloys containing titanium are difficult to process materials. They combine high hardness and low thermal conductivity, which leads to a deterioration in cutting performance. With traditional cutting, problems arise related to heating the cutting tool to a high temperature, vibration, and chip formation and removal from the cutting area. The use of vibration of the cutting tool during the machining process makes it possible to reduce the temperature in the cutting area and external vibrations, make it easier to remove chips and reduce its size, as well as increase the cutting depth. Vibration of the cutting tool makes it possible to reduce roughness, remove burrs, improve the accuracy of the resulting dimensions and the productivity of machining. The microstructure of the surface obtained using an interferometer at different values of the instrument rotation frequency is considered. The effect of vibrations on chip formation is shown.

**EDN:** YJUTYY, <https://elibrary/yjuty>**Keywords:** vibration cutting, vibration processing, machining productivity, chip texture, vibrations in the ultrasonic range

Область применения материалов в аэрокосмической промышленности определяется их свойствами. К основным из них относятся низкие плотность и коэффициент теплового расширения, устойчивость к высокой температуре и высокая коррозионная стойкость. По сравнению с большинством сталей титановые сплавы имеют более высокие удельную прочность, коррозионную стойкость и уменьшенную в 2 раза массу, благодаря чему они получают все большее распространение в аэрокосмической отрасли [1]. В дополнение к хорошей усталостной прочности титановые сплавы обладают высокой трещиностойкостью [2].

Алюминиевые сплавы, сочетающие в себе небольшую массу, высокую прочность и обрабатываемость, уже более столетия применяются в аэрокосмической промышленности. Однако у них есть такие существенные недостатки, как низкий модуль упругости и довольно низкая способность выдерживать высокую температуру, а высокопрочные сплавы подвержены коррозии [3].

Цель работы — определение современного способа обработки, дополняющего традиционное резание, позволяющего повысить производительность при обеспечении качества обработанной поверхности.

Среди современных способов следует выделить вибрационное резание. Добавление режущему инструменту (далее инструмент) вибрации в ультразвуковом диапазоне не только повышает производительность обработки без потери качества, но и позволяет выполнять ранее недоступные операции.

Ультразвуковая вибрационная обработка представляет собой процесс резания, при котором на инструмент или заготовку воздействуют колебания с постоянной частотой в пределах ультразвукового диапазона для улучшения условий удаления материала. Токарная обработка, сверление и фрезерование являются основными областями использования и изучения ультразвуковой вибрационной обработки [4].

**Обработка.** Благодаря эксплуатационным достоинствам титановые сплавы получили широкое применение в аэрокосмическом и медицинском оборудовании [5]. Однако при обработке заготовок из титановых сплавов необходимо учитывать низкую теплопроводность металла, приводящую к ухудшению характеристик резания [6].

Другая сложность резания титана заключается в сохранении высокой прочности при высокой температуре, возникающей в процессе механической обработки, вследствие чего происходит ограничение пластической деформации, необходимой для образования стружки [7]. Также следует учитывать склонность титана к воспламенению при высокой температуре. Высокая степень упрочнения в процессе резания усложняет обработку.

При обработке тонкостенных деталей тонкие участки упруго деформируются, поэтому обеспечивать точность размеров и чистоту поверхности затруднительно [8]. Для преодоления этой проблемы применяют ультразвуковую вибрационную обработку. При такой обработке вибрация в ультразвуковом диапазоне воздействует на инструмент (или заготовку) для достижения прерывистого резания, что обеспечивает отделение стружки от инструмента, тем самым снижается температура в зоне резания, а также повышается производительность процесса.

Экспериментальные исследования показали, что ультразвуковая вибрационная обработка позволяет улучшить качество резания титановых сплавов [9]. Технико-экономическое обоснование высокоскоростной ультразвуковой вибрационной обработки титановых сплавов показало, что она обеспечивает меньшую силу резания и увеличивает стойкость инструмента, снижает деформацию стружки и повышает скорость удаления материала [10].

В работе [11] обработку титанового сплава выполняли разными способами при одинаковой глубине резания. Сначала без применения вибрации, затем задавали режущей кромке инструмента вибрацию в одном направлении. Далее обрабатывали поверхность с применением вибрации в двух направлениях для получения траектории в виде эллипса. После завершения эксперимента проводили фотосъемку полученной поверхности.

Как видно из рис. 1, *а*, на обработанную поверхность налипло много частиц, которые расположены незакономерно и вызваны случайной вибрацией инструмента в процессе обычного (традиционного) резания [12]. После резания с применением вибрации в одном направлении (рис. 1, *б*) частицы практически отсутствуют, но видны следы обработки. При резании с вибрацией в двух направлениях (рис. 1, *в*) температура резания была ниже, чем

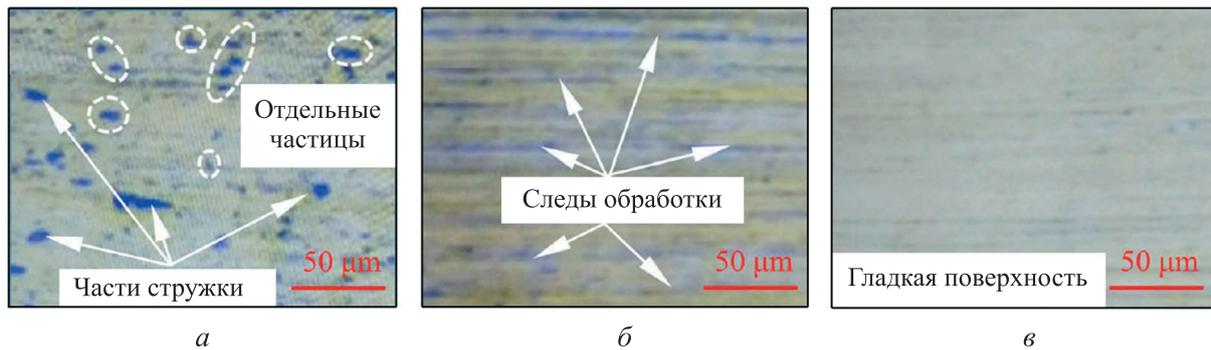


Рис. 1. Внешний вид поверхностей, полученных резанием без применения (а) и с применением вибрации в одном (б) и двух (в) направлениях

при обработке без колебательного движения, паразитная вибрация инструмента была подавлена уменьшением силы, что позволило получить наилучшую поверхность [11].

Следует отметить, что на поверхности, полученной резанием без применения вибрации, появились такие дефекты, как прилипшие частицы, фрагменты стружки и канавки, что также отрицательно сказалось на ее шероховатости [11].

По результатам обработки матрицы из алюминия [13] установлено, что применение ультразвуковой вибрации позволяет улучшить шероховатость обработанной поверхности и уменьшить скорость изнашивания инструмента.

**Процесс стружкообразования.** Стружка образуется благодаря сдвигу плоскости, когда напряжение, создаваемое относительным движением инструмента, превышает предел текучести материала. Энергия, связанная с этой деформацией, немедленно преобразуется в тепловую, а температура значительно повышается из-за плохих теплофизических свойств титана. Это вызывает локальное температурное размягчение, и деформация продолжается в той же плоскости, а не перемещается в новую [14]. По мере продолжения деформации плоскость сдвига становится завихренной, увеличиваясь до тех пор, пока полученная сила не превысит необходимое значение для пластической деформации соседней плоскости холодного материала. Этот процесс приводит к циклическому процессу образования пилообразной стружки.

Такой циклический механизм образования стружки сопровождается значительным изменением силы, действующей на инструмент, что вызывает случайные вибрации и создание неровной поверхности.

Процесс катастрофического термопластического сдвига, при котором образуется титановая стружка, приводит к высокой температуре кромки инструмента, достигающей примерно 1100 °С. Это явление обусловлено низкой теплопроводностью титана, относительно небольшой площадью контакта и очень малой площадью текучести между стружкой и инструментом, которая составляет около 8 мкм (против 50 мкм при обработке стали с теми же условиями резания).

По результатам обработки разных сплавов титана [15] установлено, что самые высокие температуры наблюдаются около режущей кромки инструмента из-за тонкой стружки, небольшой зоны вторичного среза и малой области контакта с инструментом. Также показано, что чем прочнее обрабатываемый материал (чем больше содержание бета-фазы), тем выше температура, получаемая при механической обработке при тех же режимах резания. Силы резания при обработке титана соответствуют таковым для стали, но так как площадь контакта очень мала, (в 2–3,5 раза меньше, чем при обработке стали), в непосредственной близости к режущей кромке возникают высокие напряжения.

**Фрезерование с применением вибраций.** Получение требуемого размера при обработке тонкостенных деталей из титанового сплава является чрезвычайно сложной задачей, что обусловлено не только упругой деформацией, но и возникающей в процессе резания паразитной вибрацией. Применение управляемых колебаний инструмента в ультразвуковом диапазоне позволяет снизить среднюю силу резания, высоту следов царапин и шероховатость поверхности относительно традиционного способа обработки с теми же режимами резания.

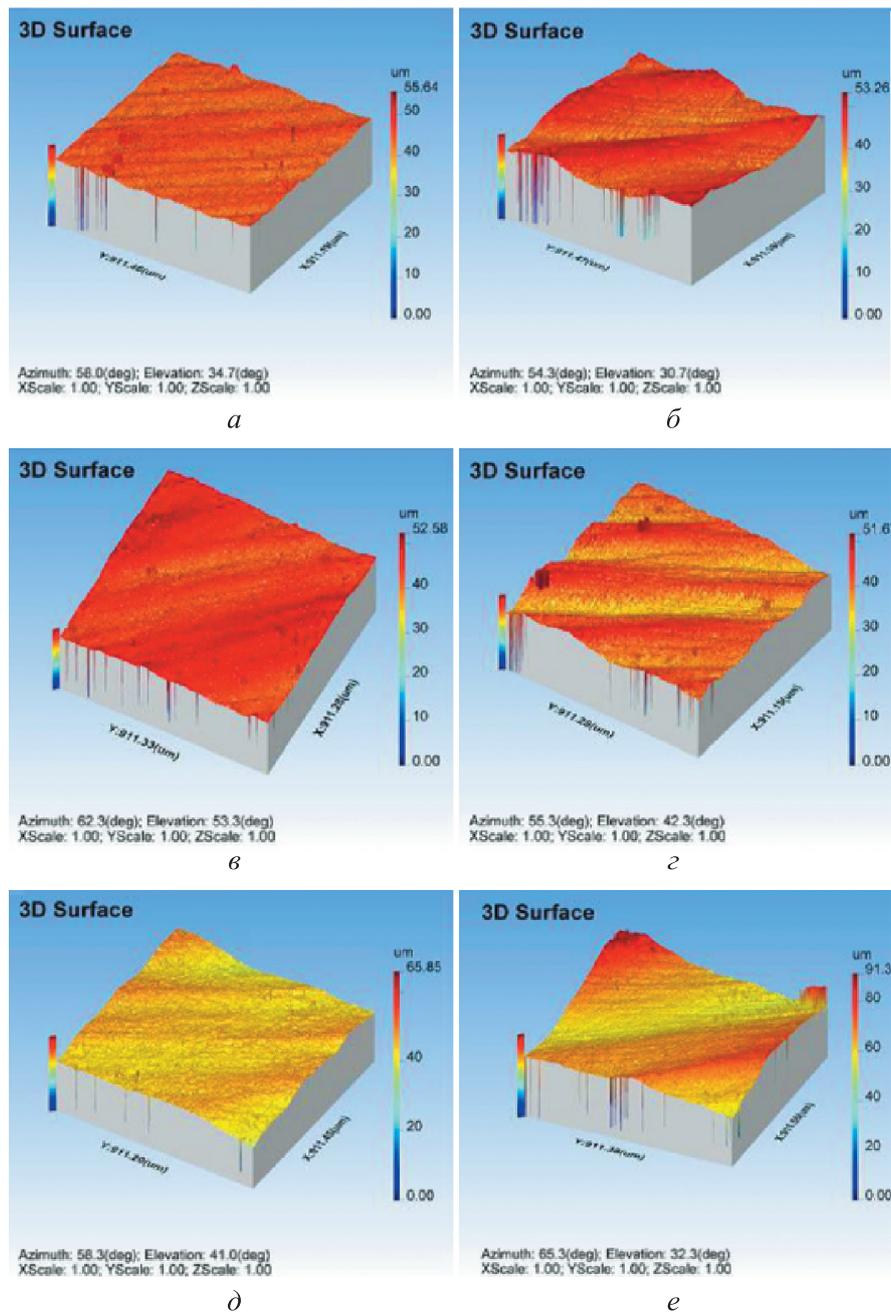


Рис. 2. Микроструктуры поверхностей, полученные с помощью интерферометра, после обработки с применением (*а, в, д*) и без применения (*б, г, е*) вибрации при различных значениях частоты вращения инструмента: *а, б* —  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ; *в, г* —  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ; *д, е* —  $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Эксперимент по фрезерованию титана [16] показал, что увеличение амплитуды вибрации приводит к снижению силы резания и улучшению качества обработки поверхности. При фрезеровании с более высокой амплитудой происходит упрочнение поверхности с повышенным остаточным напряжением сжатия. Основные режущие кромки инструмента при обработке с применением вибрации изнашиваются на 20 % меньше, чем при традиционном резании.

В работе [17] установлено, что колебания, направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности, приводят к переменной толщине стружки. При низкой скорости резания колебания в направлении резания становятся причиной прерывистого резания, что снижает паразитные вибрации.

Микроструктуры поверхностей, полученные с помощью интерферометра, после обработки с применением и без применения вибрации при

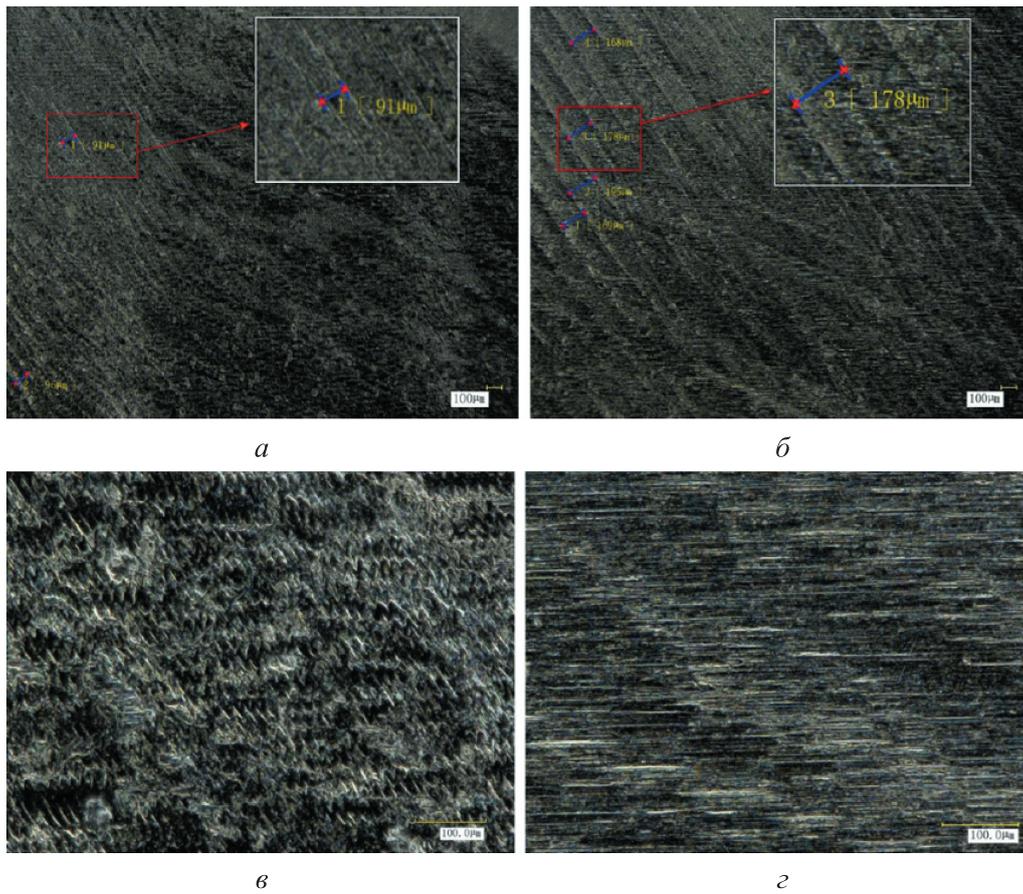


Рис. 3. Микроструктуры поверхностей, полученные с помощью электронного микроскопа, после обработки с применением (а, в) и без применения (б и г) вибрации при увеличении  $\times 100$  (а, б) и  $\times 500$  (в, г)

частоте вращения инструмента  $n = 1000, 2000$  и  $3000 \text{ мин}^{-1}$  показаны на рис. 2, а–е [17].

Результаты обработки поверхностей с применением и без применения вибрации приведены на рис. 3, а–г.

По результатам измерений установлено, что плотность (кучность) и высота трещин на поверхности тонкостенных деталей после обработки с применением вибрации меньше, чем после традиционного резания, а поверхность более прямолинейная и гладкая [8].

**Результат обработки.** Внешний вид стружки зависит от температуры, сил резания и скорости упрочнения/размягчения при обработке заготовки. С увеличением скорости подачи критическая скорость резания уменьшается, так как температура резания повышается [7].

Применение вибрации в процессе резания ускоряло отвод стружки, которая уносила с собой большое количество теплоты из зоны резания.

Внешний вид стружки, полученной при различных значениях амплитуды вибрации, показан на рис. 4, а–г. Благодаря эффекту прерывистого резания при обработке с применением вибрации получена более однородная стружка, чем при традиционном фрезеровании с теми же режимами резания. Также можно заметить, что с увеличением амплитуды вибрации размер стружки уменьшается [4].

В работе [11] приведены результаты обработки сплава Ti-6Al-4V тремя способами: без применения вибрации и с ее применением в одном и двух направлениях (рис. 5, а–в).

При резании без применения вибрации получена длинная непрерывная ленточная стружка (см. рис. 5, а), что можно объяснить сдвигом материала вдоль зоны первичного сдвига [18]. Так как при сверхточном точении поперечное сечение стружки было очень маленьким из-за сверхмалой глубины резания, стружка обладает сверхвысокой пластичностью (низкой ломкостью). Кроме того, на малой площади резания

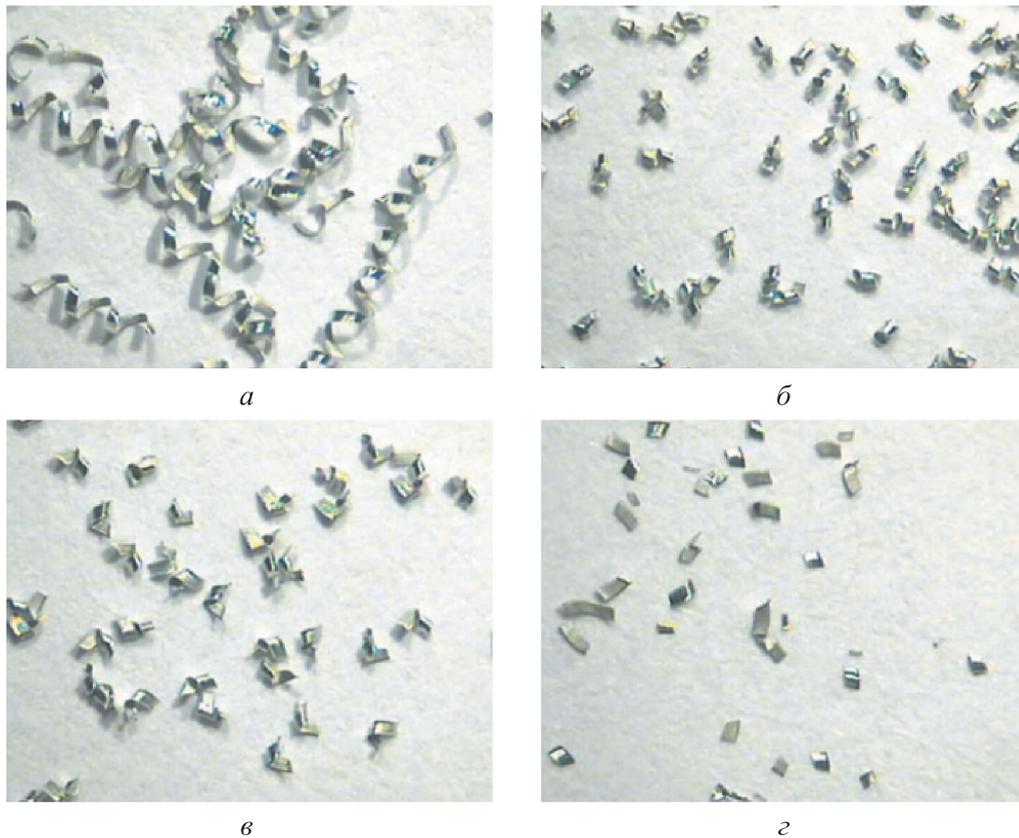


Рис. 4. Внешний вид стружки, полученной при амплитуде вибрации  $A = 0$  (а), 4 (б), 6 (в) и 8 мкм (г)

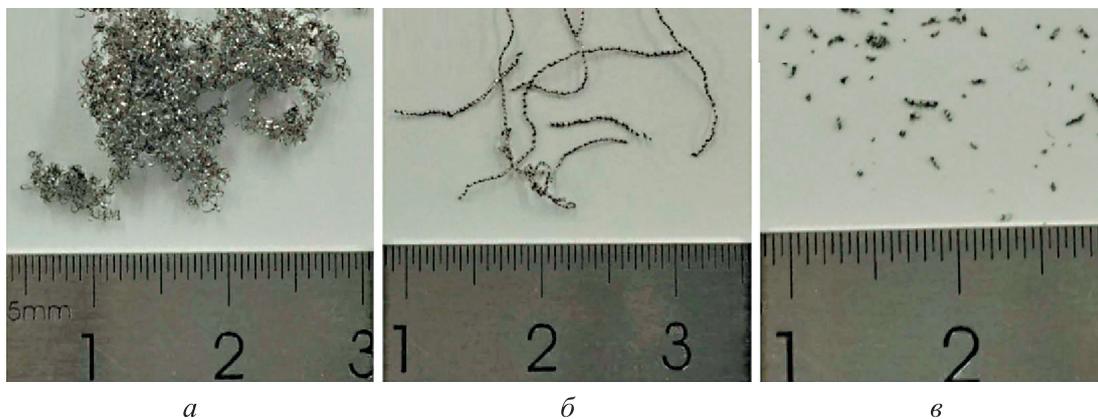


Рис. 5. Внешний вид стружки, полученной резанием без применения (а) и с применением вибрации в одном (б) и двух (в) направлениях

выделялось и удерживалось большое количество теплоты, что приводило к чрезвычайно высокой температуре резания и еще больше повышало пластичность обработанного материала и способность стружки к изгибу. Таким образом, длинная непрерывная ленточная стружка из-за высокой температуры в зоне резания оставалась на обрабатываемой поверхности. Следует отметить, что длинная непрерывная ленточная стружка нежелательна в процессе механической обработки, так как она имеет

тенденцию царапать обрабатываемую поверхность и вызывать порчу инструмента.

При резании с применением вибрации в одном направлении получена спиралевидная стружка (см. рис. 5, б), которая не наматывается на инструмент и может легко удаляться. В процессе обработки сила резания была меньше, а выделяемая теплота быстро рассеивалась вследствие прерывистого резания. Таким образом, пластичность материала снижалась из-за пониженной температуры резания, что умень-

шало способность к изгибу стружки. Кроме того, режущее движение инструмента всегда сопровождалось линейной высокочастотной периодической вибрацией, а переменные удары инструмента приводили к концентрации энергии в зоне резания [19]. Стружка легко отделялась от заготовки, и улучшались условия ее удаления.

При резании с применением вибрации в двух направлениях получена короткая спиральная стружка (см. рис. 5, в). Температура в зоне резания была самой низкой, что дополнительно способствовало разрушению стружки [20].

По форме стружки можно судить о силе резания. При резании без применения вибрации на стружке образовались зазубрины, указывающие на значительную силу резания, а на поверхности стружки, контактирующей с инструментом, — микродефекты (рис. 6, а).

При резании с вибрацией в одном направлении поверхность стружки оказалась гладкой (без зазубрин) и без дефектов, но там, где она контактировала с инструментом, появилась особая текстура (рис. 6, б). В процессе резания

стружка регулярно скручивалась, а расстояние между ее соседними кромками составляло около 235 мкм. Это можно объяснить тем, что в процессе ультразвуковой обработки поверхности в одном направлении сила и температура резания снизились из-за сокращения времени резания за один период вибрации, что уменьшило силу резания. В результате была получена стружка с гладкой стороной без зазубрин. Кроме того, периодическая вибрация инструмента способствовала равномерному скручиванию стружки [21].

При обработке с применением вибрации в двух направлениях образовалась стружка, показанная на рис. 6, в. Ее скручивание более равномерное, а радиус меньше [11]. Расстояние между соседними кромками стружки составляло 138 мкм.

Зависимости средних сил резания в радиальном  $F_r$  и осевом  $F_f$  направлениях от частоты вращения инструмента  $n$  при обработке без применения и с применением вибрации приведены на рис. 7. Видно, что с повышением частоты вращения инструмента обе составляющие силы резания увеличиваются [8].

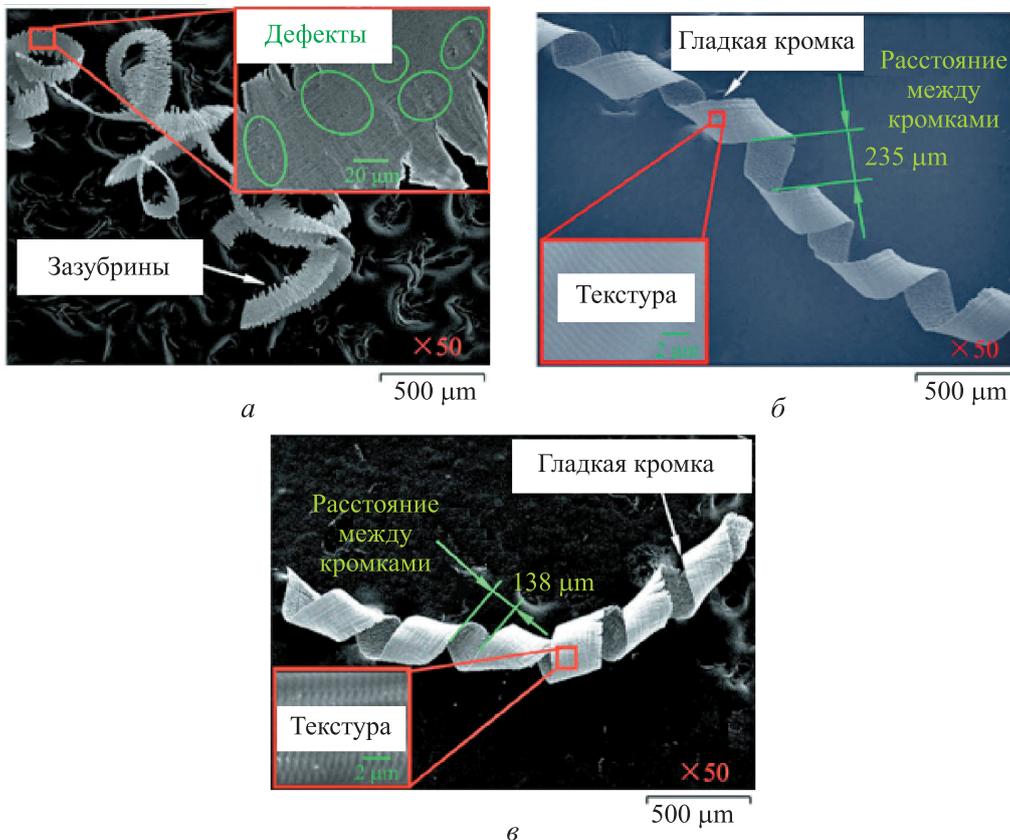


Рис. 6. Формы стружки, полученные с помощью электронного микроскопа, после резания без применения (а) и с применением вибрации в одном (б) и двух (в) направлениях

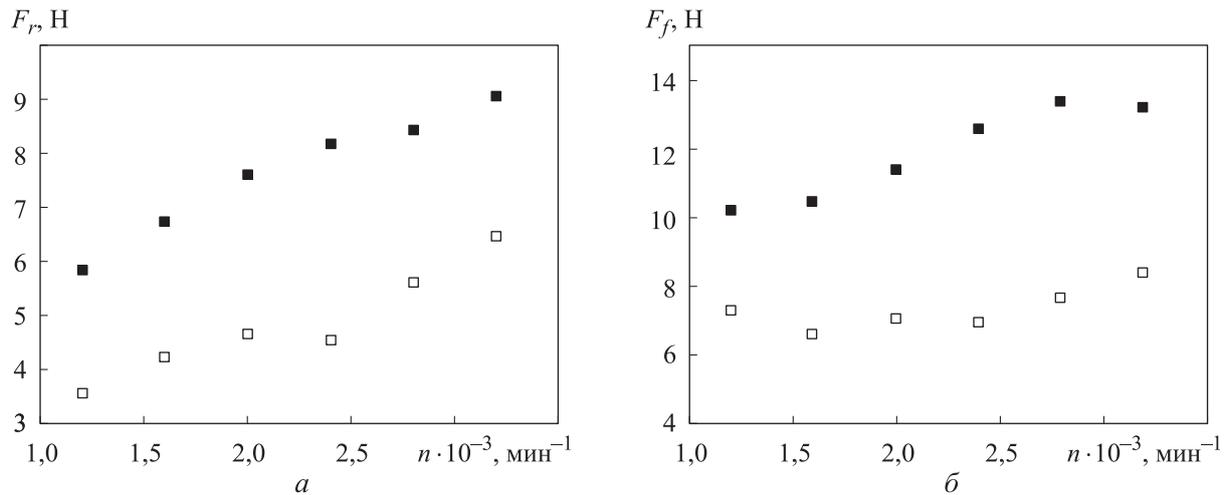


Рис. 7. Зависимости средних сил резания в радиальном  $F_r$  (а) и осевом  $F_f$  (б) направлениях от частоты вращения инструмента  $n$  при обработке без применения (■) и с применением (□) вибрации

Зависимости параметра шероховатости поверхности  $Ra$  от частоты вращения инструмента  $n$  показаны на рис. 8. После обработки с применением вибрации параметр шероховатости поверхности тонкостенной детали из титанового сплава оказался значительно меньше, чем после традиционного резания [8].

Следует отметить, что частота вращения инструмента значительно влияет на шероховатость поверхности как при вибрационной обработке, так и при традиционной.

Анализ результатов [8] показал, что применение вибрационного резания улучшает качество обработанной поверхности по сравнению с традиционным способом обработки.

На основании изложенного можно заключить, что использование вибрации позволяет

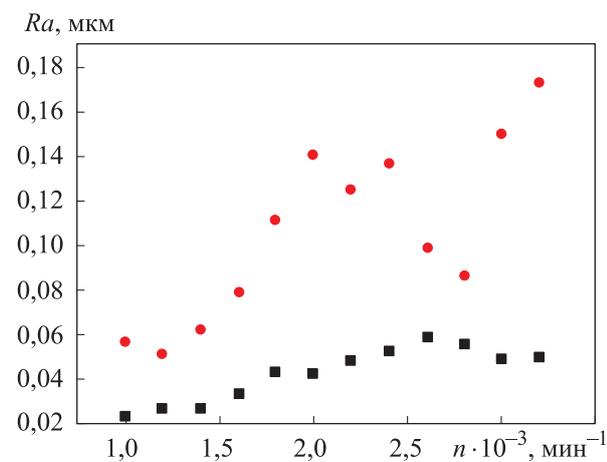


Рис. 8. Зависимости параметра шероховатости обрабатываемой поверхности  $Ra$  от частоты вращения инструмента  $n$  при резании без применения (●) и с применением вибрации (■)

улучшить чистоту поверхности, уменьшить подповерхностную деформацию, изменить характеристики стружки (способствуя ее разрушению, что улучшает ее удаление), устранить наросты на кромке и продлить срок службы инструмента.

## Выводы

1. Применение вибрации в процессе формообразования позволяет улучшить качество обрабатываемой поверхности, уменьшить ее шероховатость, облегчить процесс резания и продлить срок службы инструмента.

2. Заданная вибрация режущей кромки в процессе обработки способствует уменьшению выкрашивания, снижает средние силы резания примерно в 2 раза, повышая стойкость инструмента.

3. Назначение рациональной амплитуды и частоты вибраций позволяет уменьшить шероховатость обработанной поверхности в 3,5 раза. После вибрационного резания наименьший параметр шероховатости поверхности детали составил 23 нм, а после традиционного — 51 нм.

4. Использование вибрации при сверхточной обработке, где глубина резания составляет микрометры, позволяет изменить тип стружки, что предотвращает повреждение поверхности, уменьшая количество бракованных изделий.

5. Увеличение амплитуды вибрации приводит к повышению пластичности и уменьшению размеров стружки, что способствует более эффективному удалению теплоты из зоны резания.

6. При росте частоты вращения инструмента происходит увеличение средней силы резания, но ее можно компенсировать, повышая частоту вибрации инструмента. Тем самым можно под-

нимать частоту вращения инструмента без значительного изменения силы резания, а следовательно, повышать производительность.

## Литература

- [1] Peters M., Kumpfert J., Ward C. et al. Titanium alloys for aerospace applications. *Adv. Eng. Mater.*, 2003, no. 5, pp. 419–427, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>
- [2] Inagaki I., Shirai Y., Takechi T. et al. Application and features of titanium for the aerospace industry. *Nippon Steel & Sumitomo Metal technical report no. 106*, 2014, pp. 22–27.
- [3] Campbell F.C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Elsevier, 2006. 600 p.
- [4] Shen X.H., Zhang J.H., Li H. et al. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 63, no. 1–4, pp. 41–49, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3882-5>
- [5] Thepsonthi T., Özel T. 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: experimental validations on chip flow and tool wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 2015, no. 221, pp. 128–145, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.019>
- [6] Zhao X. Features and special processing method for difficult-to-cut material in aviation industry. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, vol. 52, no. 23, pp. 50–51, <https://doi.org/10.16080/j.issn1671-833x.2009.23.015>
- [7] Machado A., Wallbank J. Machining of titanium and its alloys—a review. *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 1990, vol. 204, no. 1, pp. 53–60, doi: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1990\\_204\\_047\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1990_204_047_02)
- [8] Tong J., Wei G., Zhao L. et al. Surface microstructure of titanium alloy thin-walled parts at ultrasonic vibration-assisted milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 101, no. 5, pp. 1007–1021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3005-7>
- [9] Kei H., Hiroyuki S. Effect of dynamic response and displacement/stress amplitude on ultrasonic vibration cutting. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, vol. 209, no. 9, pp. 490–495, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.026>
- [10] Sui H., Zhang X., Zhang D. et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy. *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 247, pp. 111–120, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.017>
- [11] Tan R., Zhao X., Zhang S. et al. Study on ultra-precision processing of Ti-6Al-4V with different ultrasonic vibration-assisted cutting modes. *Mater. Manuf. Process.*, 2019, vol. 34, no. 12, pp. 1380–1388, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1660788>
- [12] Yip W.S., To S. Tool life enhancement in dry diamond turning of titanium alloys using an eddy current damping and a magnetic field for sustainable manufacturing. *J. Clean. Prod.*, 2017, vol. 168, pp. 929–939, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.100>
- [13] Nath S., Rahman M., Andrew S.S.K. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, vol. 192–193, pp. 159–165, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047>
- [14] Cook N.H. Chip formation in machining titanium. *Proc. Symposium on Grinding of Titanium*, 1953, p.1–7
- [15] Kirk D.C. *Tools and dies for industry*. London, Metals Society, 1976, pp. 186–191.
- [16] Rinck P., Güray A. Modeling of cutting forces in 1-D and 2-D ultrasonic vibration-assisted milling of Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 119, no. 1–3, pp. 1807–1819, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08355-x>
- [17] Gao J., Altintas Y. Chatter stability of synchronized elliptical vibration assisted milling. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2020, vol. 28, pp. 76–86, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.11.006>
- [18] Yip W.S., To S. Ductile and brittle transition behavior of titanium alloys in ultra-precision machining. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, pp. 105–121, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22329-2>

- [19] Hu L. *Research on diamond tool wear and its ultrasonic vibration suppression of ultraprecision cutting titanium alloy*. PhD Thesis. Harbin Institute of Technology, 2015. 231 p.
- [20] Faga M.G., Priarone P.C., Robiglio M. et al. Technological and sustainability implications of dry, near-dry, and wet turning of Ti-6Al-4V alloy. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 129–139, doi: <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0016-z>
- [21] Zhang X.Q., Kumar A.S., Rahman M. et al. An analytical force model for orthogonal elliptical vibration cutting technique. *J. Manuf. Process.*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 378–387, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.05.006>

## References

- [1] Peters M., Kumpfert J., Ward C. et al. Titanium alloys for aerospace applications. *Adv. Eng. Mater.*, 2003, no. 5, pp. 419–427, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>
- [2] Inagaki I., Shirai Y., Takechi T. et al. Application and features of titanium for the aerospace industry. *Nippon Steel & Sumitomo Metal technical report no. 106*, 2014, pp. 22–27.
- [3] Campbell F.C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Elsevier, 2006. 600 p.
- [4] Shen X.H., Zhang J.H., Li H. et al. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 63, no. 1–4, pp. 41–49, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3882-5>
- [5] Thepsonthi T., Özel T. 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: experimental validations on chip flow and tool wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 2015, no. 221, pp. 128–145, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.019>
- [6] Zhao X. Features and special processing method for difficult-to-cut material in aviation industry. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, vol. 52, no. 23, pp. 50–51, <https://doi.org/10.16080/j.issn1671-833x.2009.23.015>
- [7] Machado A., Wallbank J. Machining of titanium and its alloys—a review. *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 1990, vol. 204, no. 1, pp. 53–60, doi: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1990\\_204\\_047\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1990_204_047_02)
- [8] Tong J., Wei G., Zhao L. et al. Surface microstructure of titanium alloy thin-walled parts at ultrasonic vibration-assisted milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 101, no. 5, pp. 1007–1021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3005-7>
- [9] Kei H., Hiroyuki S. Effect of dynamic response and displacement/stress amplitude on ultrasonic vibration cutting. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, vol. 209, no. 9, pp. 490–495, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.026>
- [10] Sui H., Zhang X., Zhang D. et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy. *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 247, pp. 111–120, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.017>
- [11] Tan R., Zhao X., Zhang S. et al. Study on ultra-precision processing of Ti-6Al-4V with different ultrasonic vibration-assisted cutting modes. *Mater. Manuf. Process.*, 2019, vol. 34, no. 12, pp. 1380–1388, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1660788>
- [12] Yip W.S., To S. Tool life enhancement in dry diamond turning of titanium alloys using an eddy current damping and a magnetic field for sustainable manufacturing. *J. Clean. Prod.*, 2017, vol. 168, pp. 929–939, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.100>
- [13] Nath S., Rahman M., Andrew S.S.K. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, vol. 192–193, pp. 159–165, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047>
- [14] Cook N.H. Chip formation in machining titanium. *Proc. Symposium on Grinding of Titanium*, 1953, p.1–7
- [15] Kirk D.C. *Tools and dies for industry*. London, Metals Society, 1976, pp. 186–191.
- [16] Rinck P., Güray A. Modeling of cutting forces in 1-D and 2-D ultrasonic vibration-assisted milling of Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 119, no. 1–3, pp. 1807–1819, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08355-x>
- [17] Gao J., Altintas Y. Chatter stability of synchronized elliptical vibration assisted milling. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2020, vol. 28, pp. 76–86, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.11.006>

- [18] Yip W.S., To S. Ductile and brittle transition behavior of titanium alloys in ultra-precision machining. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, pp. 105–121, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22329-2>
- [19] Hu L. *Research on diamond tool wear and its ultrasonic vibration suppression of ultraprecision cutting titanium alloy*. PhD Thesis. Harbin Institute of Technology, 2015. 231 p.
- [20] Faga M.G., Priarone P.C., Robiglio M. et al. Technological and sustainability implications of dry, near-dry, and wet turning of Ti-6Al-4V alloy. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 129–139, doi: <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0016-z>
- [21] Zhang X.Q., Kumar A.S., Rahman M. et al. An analytical force model for orthogonal elliptical vibration cutting technique. *J. Manuf. Process.*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 378–387, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.05.006>

Статья поступила в редакцию 19.01.2025

## Информация об авторах

**ОБРАЗЦОВ Александр Евгеньевич** — аспирант кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [obrazcow2@mail.ru](mailto:obrazcow2@mail.ru)).

**УТЕНКОВ Владимир Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [utencov@bmstu.ru](mailto:utencov@bmstu.ru)).

**КУЗНЕЦОВ Павел Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [profpol@rambler.ru](mailto:profpol@rambler.ru)).

## Information about the authors

**OBRAZTSOV Aleksandr Evgenievich** — Postgraduate, Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [obrazcow2@mail.ru](mailto:obrazcow2@mail.ru)).

**UTENKOV Vladimir Mikhailovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Metal-Cutting Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [utencov@bmstu.ru](mailto:utencov@bmstu.ru)).

**KUZNETSOV Pavel Mikhailovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Metal-Cutting Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [profpol@rambler.ru](mailto:profpol@rambler.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Образцов А.Е., Утенков В.М., Кузнецов П.М. Повышение производительности механообработки при вибрационном резании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 34–44.

### Please cite this article in English as:

Obraztsov A.E., Utenkov V.M., Kuznetsov P.M. Increasing the productivity of machining during vibration cutting. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 34–44.