

ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВИБРАЦИЯМИ

М.П. Козочкин¹, Н.В. Солис-Пинарготе²

¹Кафедра технологии машиностроения
Факультет машиностроительных технологий и оборудования
Московский государственный технологический университет «Станкин»
Вадковский пер., 1, Москва, Россия, 127055

²Кафедра технологий машиностроения,
металлорежущих станков и инструментов
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 115093

Изложены результаты экспериментальных исследований процесса резания с применением тангенциальных ультразвуковых вибраций. Показаны особенности стружкообразования при использовании СОТС, даны обоснования причин повышения чистоты обработки и снижения твердости снимаемой стружки.

Ключевые слова: процесс резания, ультразвуковые колебания, пластические деформации, опережающая трещина, силы резания, чистота поверхности, режущий клин, передний угол, ультразвуковые вибрации.

Лезвийной обработке с наложением ультразвуковых (УЗ) вибраций было посвящено много работ в середине прошлого века. Однако широкого распространения в промышленности такая УЗ технология не получила. Связано это с дополнительными сложностями технической реализации метода и теми ограничениями, которые накладывают на режимы обработки требования эффективного применения УЗ технологий. Можно еще упомянуть встречающиеся противоречивые сведения об оценках позитивного и негативного влияния УЗ на качество обрабатываемых поверхностей, стойкостные и силовые характеристики процесса резания в условиях применения УЗ колебаний. Однако за прошедшее время изменился и режущий инструмент, и обрабатываемые материалы. Значительно усовершенствовались и сами УЗ установки за счет использования авторезонансных УЗ технологий [1]. Появились задачи, связанные с лезвийной обработкой оптических материалов с нанометрической точностью, где требования к качеству получаемых поверхностей и поверхностного слоя столь высоки, что позволяют закрыть глаза на не принимаемые во внимание ограничения, накладываемые на режимы УЗ точения [2; 3]. В связи с этим ниже рассматриваются некоторые аспекты применения УЗ при лезвийной обработке, которым в предыдущих исследованиях было уделено недостаточно внимания.

В качестве основных причин тех положительных эффектов, которые создаются УЗ технологиями, обычно называют снижение сил трения в зоне резания,

устранение нароста, инициацию движения дислокаций в обрабатываемом материале, обеспечение доступа смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) в зону резания, повышение устойчивости процесса [4]. На рис. 1 схематично показаны силы, действующие на элемент стружки со стороны передней грани резца. Вектор равнодействующей силы R , образованный силой трения F и силой нормального давления N , можно разложить на составляющие, параллельную ($P_{сдв}$) и перпендикулярную ($P_{сж}$) линии сдвига. Составляющая $P_{сдв}$ создает сдвигающую силу и изгибающий момент M в сходящей стружке, который растет по мере удаления от режущей кромки точки приложения равнодействующей силы R на передней поверхности, а сила $P_{сж}$ препятствует растяжению прирезцового слоя стружки и раскрытию трещин, возникающих в стружке в процессе пластической деформации.

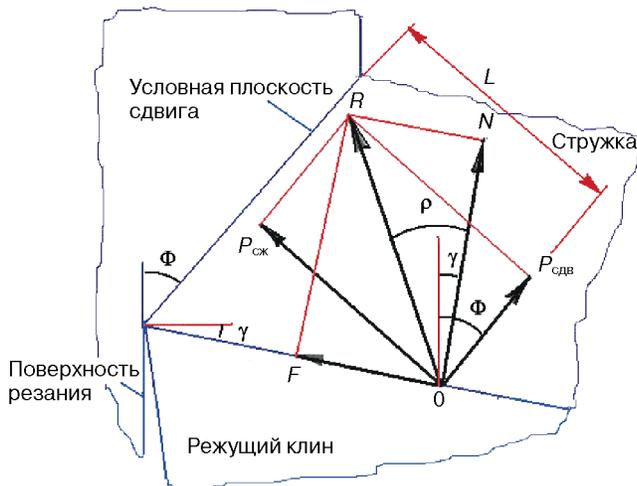


Рис. 1. Схема сил, действующих на элемент стружки со стороны передней поверхности резца

Формулы, описывающие силовые факторы, могут быть представлены в таком виде:

$$M(t) = P_{сдв} L = P_{сдв} V/\xi t \sin(\pi - \delta - \Phi)k, \quad (1)$$

$$P_{сдв} = R \cos(\rho + \Phi - \gamma), \quad (2)$$

$$P_{сж} = R \sin(\rho + \Phi - \gamma), \quad (3)$$

где L — плечо изгибающего момента; V — скорость резания; ξ — коэффициент усадки, t — время; δ — угол резания, равный $\pi/2 - \gamma$; ρ — угол трения; γ — передний угол; Φ — угол сдвига; $k < 0,5$ — коэффициент, учитывающий уменьшение скорости движения точки приложения равнодействующей R по сравнению со стружкой.

Из формулы (1) видно, что в первом приближении момент нарастает пропорционально времени на протяжении периода формирования элемента стружки. Сила $P_{сдв}$ тоже меняется во времени хотя и более сложным образом из-за неравномерности распределения давления по передней поверхности.

Изгибающий момент стремится повернуть элемент стружки против часовой стрелки, создавая растягивающие напряжения в сходящей стружке на прирезцовой стороне и сжимающие на противоположной. Наибольшие значения растягивающих напряжений возникают в окрестности вершины инструмента. Таким образом, под действием момента элемент стружки стремится оторваться от материала заготовки в окрестности вершины резца. Сжимающие напряжения от силы $P_{сж}$ компенсируют часть растягивающих напряжений, но величина компенсации зависит от коэффициента трения стружки о переднюю поверхность инструмента. Для оценки влияния угла трения на $P_{сж}$ надо преобразовать выражение (3), выразив равнодействующую R через нормальную силу N и угол трения ρ :

$$P_{сж} = \sin(\rho + \Phi - \gamma) N / \cos(\rho). \quad (4)$$

Поскольку Φ тоже является функцией ρ , то для получения оценочного выражения можно воспользоваться формулой Эрнста [5]: $2\Phi + \rho - \gamma = \pi/2$. В этом случае выражение для сжимающей силы выглядит так:

$$P_{сж} = \sin(\rho/2 + \pi/4 - \gamma/2) N / \cos(\rho). \quad (5)$$

Если предположить, что $\operatorname{tg}(\rho) \ll 1$, что справедливо при введении УЗ воздействия, и принять $\gamma = 0$, то оценку (5) можно упростить, приблизив ее выражением:

$$P_{сж} \approx 0,7 N / \cos(\rho/2). \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что сжимающее усилие на плоскости сдвига не падает до нуля даже при полном устранении трения стружки о переднюю поверхность, а определяется долей от нормальной составляющей N . Однако если рассмотреть направление, проходящее через плоскость резания, то здесь картина несколько иная. Приняв в формуле (4) угол $\Phi = 0$, можно получить выражение для $P_{сж}$, действующей по нормали к плоскости резания:

$$P_{сж} = \sin(\rho - \gamma) N / \cos(\rho). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что при нулевом переднем угле $P_{сж}$ будет стремиться к нулю по мере уменьшения угла трения. При положительном переднем угле и малом угле трения $P_{сж}$ может оказаться отрицательной, оказывая растягивающее действие на трещины возникающие в окрестностях плоскости резания. Перед режущей кромкой возникает концентрация дислокаций [6], которые в результате действия со стороны режущего клина растягивающих сил формируют опережающую трещину. При образовании микротрещин в окрестностях вершины инструмента их поверхности остаются ювенильными из-за невозможности поступления в эту зону воздуха или СОТС. В связи с этим при обратном соприкосновении стенок таких трещин они могут «залечиваться» под влиянием молекулярных сил, поэтому и развитие опережающей трещины, значительно облегчающей отделение стружки, оказывается затрудненным. Если даже в обычной ситуации трещины на поверхности стружки и появляются, то при ее дальнейшем продвижении по передней поверхности резца через зону вторичных деформаций увеличиваются сжимающие нагрузки, стремящиеся ликвидировать возникшие трещины.

Однако на боковой поверхности толстых сливных стружек можно видеть текстуру, расходящуюся к передней поверхности. Такой пример показан на рис. 2, где представлена фотография боковой поверхности стружки толщиной 2 мм с расходящейся текстурой, полученной при обычном резании без УЗ вибраций.



Рис. 2. Фотография боковой поверхности участка сливной стружки с текстурой, расходящейся к передней поверхности резца

Теперь можно рассмотреть влияние тангенциальных УЗ колебаний, накладываемых на режущую кромку. Основным условием эффективности УЗ вибраций является требование превышения амплитудой виброскорости вынужденных УЗ колебаний величины скорости резания. В этом случае возникают регулярные разрывы между передней поверхностью и поступающим в зону резания материалом. Если обработка ведется без СОТС, то в моменты разрывов в зону резания поступает воздух, кислород которого окисляет ювенильные поверхности, что несколько препятствует «залечиванию» возникающих трещин. При введении УЗ вибраций стружка становится сливной, силы резания уменьшаются, уменьшается наклеп стружки. Считается, что с введением СОТС при лезвийной обработке с УЗ вибрациями обеспечивается охлаждение всей поверхности режущего инструмента, включая и участки, прилегающие к вершине. При обычной обработке СОТС либо не достигает окрестностей вершины, либо достигает их в очень незначительных количествах. Однако эксперименты показали, что подача СОТС при наличии УЗ вибраций может повышать чистоту поверхности, повышать стойкость инструмента, менять твердость снимаемой стружки. При обычном резании окрестности стружки, прилегающие к передней поверхности, имеют наибольшую твердость. На рис. 3 показаны графики замеров микротвердости стружки, полученной при УЗ обработке. Рис. 3а соответствует обработке без применения СОТС, а рис. 3б соответствует УЗ точению, сопровождаемому подачей свободным поливом на переднюю поверхность резца водного раствора мыла.

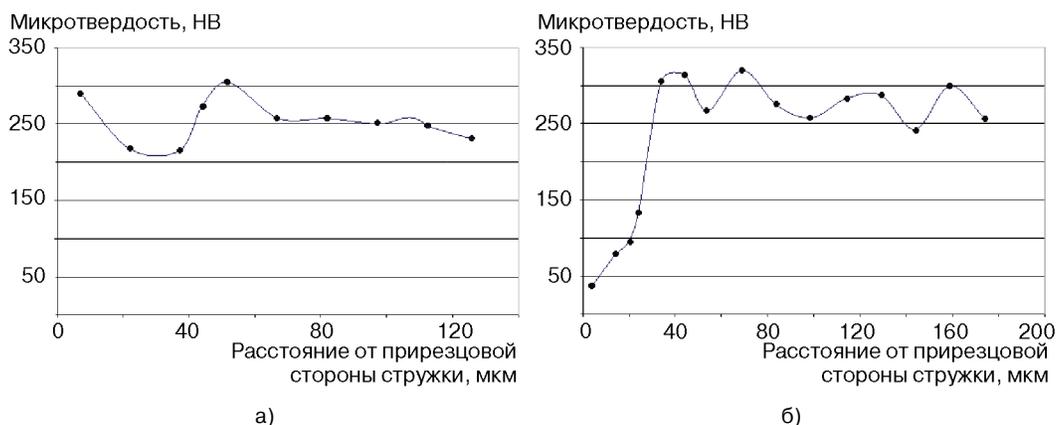


Рис. 3. Изменение микротвердости стружки из стали 18ХГТ в зависимости от расстояния от прирезцовой поверхности: а — точение с УЗ без СОТС; б — точение с УЗ с подачей СОТС

Из рис. 3а видно, что при обработке без СОТС стружка на глубину до 120 мкм имеет твердость, превышающую твердость исходного материала (166 НВ) в среднем на 50%. При введении СОТС твердость стружки на расстоянии от поверхности до 15 мкм оказалась значительно ниже твердости исходного материала (см. рис. 3б). Если добавить, что высота микронеровностей на обработанной поверхности с введением СОТС уменьшилась в среднем в 2 раза (рис. 4), то можно с полным основанием предположить, что при точении с УЗ вибрациями при наличии СОТС процесс образования микротрещин на поверхности стружки в окрестности вершины резца происходит более интенсивно.

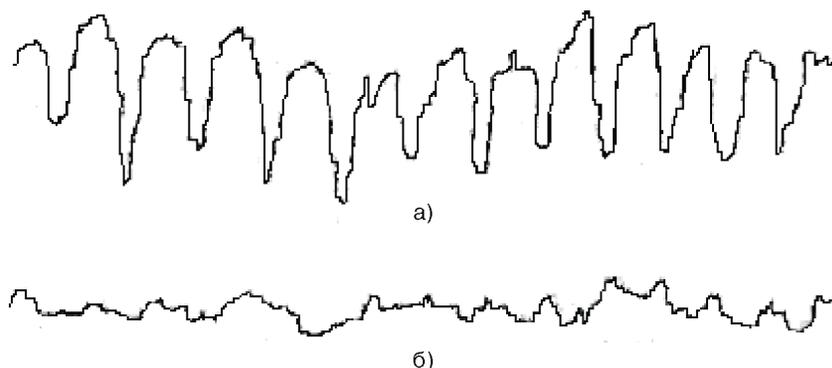


Рис. 4. Сравнение профилограмм, полученных при точении с УЗ воздействием: а — при резании без СОТС; б — при резании с СОТС

Эксперименты показывают, что при этом влияние зоны вторичной пластической деформации на текстуру стружки становится минимальным. На рис. 5 показаны фотографии микрошлифов участков стружек, полученных при точении с тангенциальными УЗ вибрациями. На рис. 5а видно, что при работе без СОТС присутствует влияние области вторичных пластических деформаций: текстура стружки,

прилегающая к передней поверхности, слегка деформирована по направлению, противоположному перемещению стружки. На рис. 5б видно отсутствие подобных деформаций. Более того, видно разрушение края стружки, проявившееся при полировке, подтверждающее предположение о наличии микротрещин. Этот факт и послужил причиной снижения твердости стружки, что и отражено на рис. 3б.

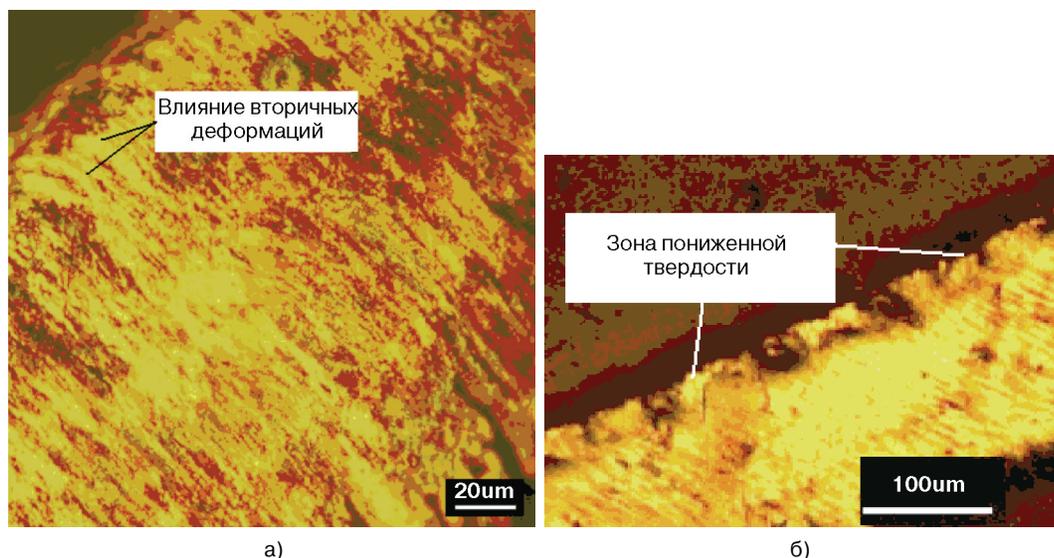


Рис. 5. Фотографии фрагментов стружки при точении с тангенциальными УЗ вибрациями:
а — без СОТС; б — с подачей СОТС

В процессе проведения исследований были проведены эксперименты по оценке влияния СОТС на прохождение УЗ энергии через зону резания. Известно, что плотность прилегания стыков во многом определяет количество УЗ энергии, проходящей через стык. Это вызывает необходимость в механических частях УЗ установок обеспечивать отсутствие стыков или при их наличии делать их максимально плотными. В эксперименте акселерометр устанавливался на неподвижный задний центр токарного станка. Он фиксировал виброускорение в частотном диапазоне, включающем частоту тангенциальных УЗ вибраций, составлявшую 23 кГц.

На рис. 6 приведен амплитудный спектр сигнала виброускорения, зафиксированного на заднем центре при точении с тангенциальными УЗ вибрациями при подаче СОТС, представлявшей водный раствор мыла. На рис. 6 спектральный максимум на частоте 23 кГц соответствует вынужденным колебаниям, создаваемым на резце. По мере прохождения УЗ энергии по упругой системе она рассеивается, но несмотря на это, ее присутствие фиксируется и на задней бабке. В левой части спектра на рис. 6 можно видеть составляющие, генерируемые процессами резания и трения.

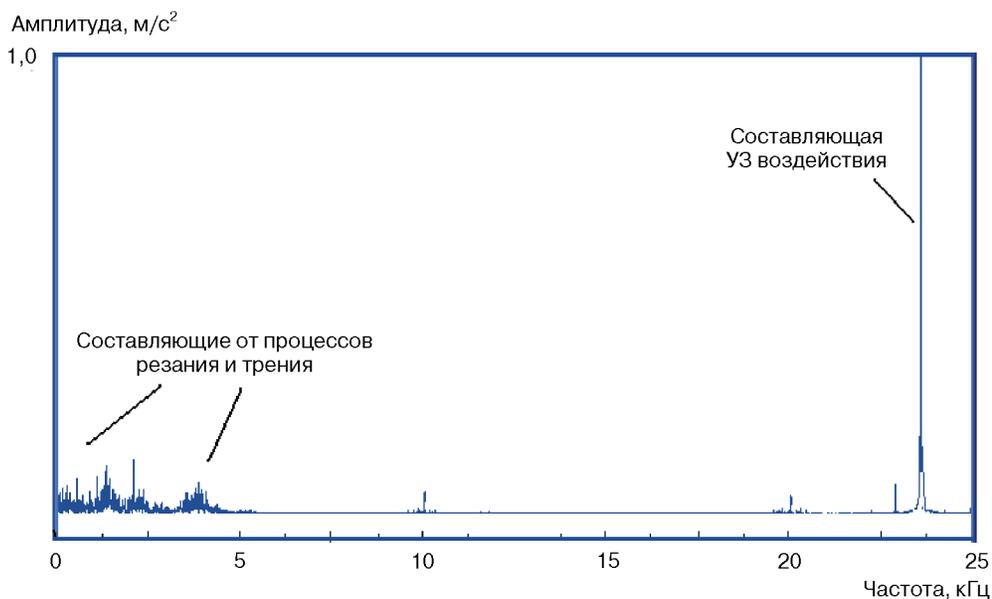


Рис. 6. Спектр виброускорения на заднем центре при точении с тангенциальными УЗ вибрациями и подачей СОТС

При таком же эксперименте, но без подачи СОТС была зафиксирована спектральная составляющая на 23 кГц с амплитудой в 4—5 раз меньше, что свидетельствует об ухудшении контакта между инструментом и заготовкой в зоне резания. Был проделан такой же эксперимент с подачей вместо раствора мыла машинного масла «индустриальное 20». Амплитуда составляющей на 23 кГц оказалась в 2 раза ниже по сравнению с аналогичной составляющей при использовании водного раствора. Это говорит о влиянии состава СОТС на прохождение УЗ колебаний через зону резания. Можно предположить, что немаловажную роль играет вязкость применяемой СОТС и ее смачивающая способность. Вязкость влияет на скорость заполнения полости, образующейся в моменты отхода передней поверхности резца от массы обрабатываемого материала, а смачивающая способность обеспечивает проникновение жидкости в микротрещины за счет капиллярного эффекта. Жидкость, проникающая в микротрещины, создает расклинивающее давление, наличие которого впервые установил Б.В. Дерягин [7]. Предполагается, что это давление в микротрещинах пропорционально поверхностному натяжению жидкости и обратно пропорционально толщине микротрещины. Поскольку наименьшая толщина микротрещин, куда еще могут проникать молекулы жидкости составляет порядка 1 нм, то расклинивающее давление может достигать значительных величин, достигающих до 100 н/мм^2 . Однако роль расклинивающего давления при УЗ обработке нельзя считать решающей, поскольку при отсутствии УЗ воздействия столь быстрого снижения твердости материалов под действием жидкости не происходит. То же можно сказать относительно непосредственного воздействия УЗ на поверхность материала без резания, но в среде различных жидкостей. Даже более длительное воздействие УЗ на поверхность металла по сравнению с резанием не дает описанного выше эффекта разупрочнения поверхности стружки. Отсюда можно

сделать вывод о том, что для получения разупрочняющего эффекта, связанного с понижением твердости поверхности стружки, необходимо наличие процесса резания с наложением УЗ вибраций и подачи СОТС. УЗ воздействие здесь выполняет дополнительно роль насоса, подающего под давлением жидкость в зону интенсивно образующихся микротрещин, включая и опережающую трещину. На рис. 7 показан пример микрошлифа корня стружки [4], полученной при обычном резании, где хорошо видно опережающую трещину, располагающуюся вдоль поверхности резания. При изготовлении микрошлифов подобные трещины в большинстве случаев бывают не видны, поскольку в образующиеся полости нет доступа не только СОТС, но и воздуха. Сопротивление продвижению стружки по передней поверхности и относительные колебания инструмента и заготовки позволяет образующимся трещинам заживать, восстанавливая сплошность среды. Присутствие УЗ вибраций позволяет проникать СОТС в полости образующихся микротрещин, образуя жидкостной клин. Этот клин под действием переменного давления, создаваемого УЗ вибрациями, ведет к дальнейшему расширению опережающей трещины и продвижению ее вдоль поверхности резания. Воздействие жидкой среды на другие микротрещины, образующиеся в стружке по тому же механизму, ведет к диспергированию материала стружки, следствием чего и было зафиксировано падение твердости до уровней ниже твердости исходного материала.



Рис. 7. Пример микрошлифа корня стружки с опережающей трещиной

Применение СОТС в сочетании с УЗ воздействием может представляться следующим образом. Жидкость, благодаря капиллярному эффекту заполняет образующиеся в районе вершины режущего инструмента микротрещины. При движении снимаемого материала навстречу передней поверхности режущего инструмента происходит сжатие части жидкости у вершины инструмента. Жидкость начинает выполнять роль режущего клина, но такого клина, который проникает в опережающую трещину и другие микротрещины, имеющие толщину нанометрического

диапазона, на глубину 10 и более мкм. При обычном резании роль режущего клина принимает на себя образующийся нарост, ведущий к увеличению переднего угла. Наличие нароста позволяет в ряде случаев снижать силы резания и увеличивать стойкость резцов, но ведет к ухудшению чистоты образуемой поверхности. Нарост не может сформировать острую режущую кромку, калибрующую образуемую поверхность на детали. Острота и проникающая способность жидкостного клина позволяют отделять стружку со значительно меньшими усилиями. Основную роль здесь играет поддержание опережающей трещины и упомянутое выше снижение сил трения. Формирование опережающей трещины позволяет отделять стружку не столько за счет сдвига, сколько за счет ее отжима от поверхности резания. Хотя при введении УЗ колебаний нарост практически не образуется, но наличие жидкостного режущего клина может значительно увеличивать фактический передний угол. Если обычный нарост хотя и увеличивает стойкость режущего инструмента, но ухудшает чистоту поверхности, то жидкостной клин позволяет повысить чистоту поверхности за счет фактической «остроты» формируемого лезвия, позволяющего раздвигать микротрещины, имеющие толщину нанометрического уровня. Из сказанного следует, что в формуле (7) при введении СОТС меняется не только угол трения, но и нормальная составляющая N , и фактический передний угол γ . Увеличение переднего угла при уменьшении угла трения может сделать сжимающую силу отрицательной, способствующей раскрытию микротрещин, облегчающей отделение стружки. Недостатком режущей кромки, сформированной жидкостным клином, является то, что она формируется геометрией опережающей трещины, поэтому калибрующая роль остается за режущей кромкой самого инструмента. В этих условиях резко возрастает значение динамической жесткости упругой системы в радиальном направлении, т. е. в направлении нормали к обрабатываемой поверхности. Следует отметить, что большинство конструкций УЗ установок для точения резцами имеют пониженную жесткость в радиальном направлении из-за особенностей конструкции волновода [7]. Волновод, на вершине которого закрепляется резец, обычно располагается перпендикулярно радиальному направлению, поэтому соответствующая составляющая силы резания действует на консоль, жесткость которой всегда ниже обычного крепления резца такого же габарита.

На основании вышеизложенного можно заключить, что для повышения эффективности УЗ обработки с применением СОТС необходима доработка традиционной конструкции закрепления режущего элемента, направленная на повышение ее радиальной жесткости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Guido P.H. Gubbels. Diamond turning of glassy polymers. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006.*
- [2] *Shamoto E. Ultraprecision micro machining of hardened die steel by applying elliptical vibration cutting. The Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 16, № 2. December 2005.*
- [3] *Асташев В.К., Андрианов Н.А., Козочкин М.П., Колик Л.В., Крупенин В.Л., Солис-Пинарготе Н.В. К реализации авторезонансной ультразвуковой технологии // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2009. — № 6. — С. 52—59.*

- [4] Вульф А.М. Резание металлов. — Л.: Машиностроение, 1973.
[5] Козочкин М.П., Солис Н.В. Исследование связи вибраций при резании с качеством получаемой поверхности // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2009. — № 2. — С. 16—23.
[6] Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Т. 3. — Томск: Красное Знамя, 1944.
[7] Кумабе Д. Вибрационное резание. — М.: Машиностроение, 1985.

INFLUENCE OF THE COOLING LIQUID ON PROCESS OF CUTTING WITH ULTRASONIC VIBRATIONS

M.P. Kozochkin¹, N.V. Solis-Pinargote²

¹Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering Technologies and Equipment
Moscow State Technological University "Stankin"
Vadkovsky lane, 1, Moscow, Russia, 127055

²Department of Engineering Technology, machine tools and instruments
Engineering Faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Podolsk highway, 8/5, Moscow, Russia, 115093

Results of experimental researches of process of cutting with application of tangential ultrasonic vibrations are stated. Features стружкообразования are shown at use of a cooling liquid, substantiations of the reasons of increase of cleanliness of processing and decrease in hardness of a removed shaving are given.

Key words: cutting process, ultrasonic fluctuations, the plastic deformations, an advancing crack, forces of cutting, cleanliness of the surface, a cutting wedge, a forward corner, ultrasonic vibrations.