

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ВИБРАЦИЙ ПРИ РЕЗАНИИ С КАЧЕСТВОМ ПОЛУЧАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М.П. Козочкин, Н.В. Солис

Кафедра технологии машиностроения,  
металлорежущих станков и инструментов  
Российский университет дружбы народов  
*Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198*

Статья посвящена исследованию механизма влияния вибраций на процесс резания. Рассматривается ультразвуковое резание как способ регулирования амплитуды автоколебаний режущего инструмента за счет релаксации с высокой частотой потенциальной энергии, накапливаемой в упругой системе при снятии стружки. Приведены примеры колебаний при обработке разных материалов.

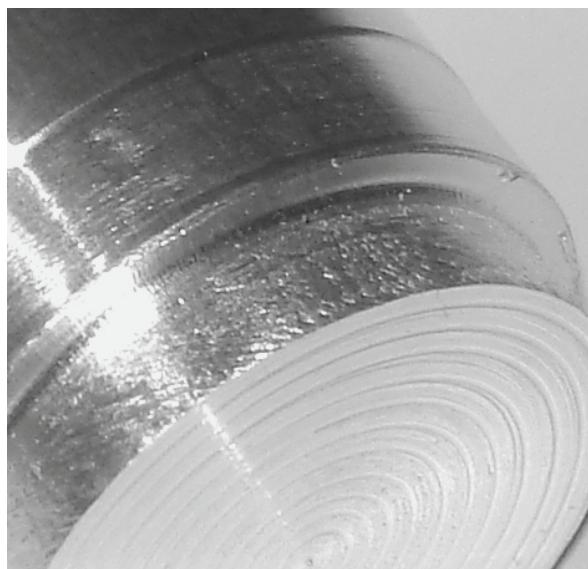
**Ключевые слова:** вибрации, точение, шероховатость поверхности, частота, амплитуда.

Процесс резания любых материалов всегда сопровождается вибрациями. При умеренных амплитудах принято считать, что вибраций нет, а при значительных — приходится говорить о потере устойчивости [1]. Большое количество работ по этой тематике направлено на устранение тех негативных последствий, которые вызываются вибрациями при резании, но встречаются работы, посвященные позитивному влиянию вибраций с рациональными параметрами на качество обработки [2]. Это не только вибрационное резание, но и резание, сопровождаемое колебаниями с допустимыми амплитудами. Справочные данные по режимам резания содержат сведения, полученные в результате экспериментов, тоже сопровождавшихся вибрациями, которые не контролировались и не могли учитываться при использовании результатов. Изменение характера вибраций может дать другие результаты при сохранении режимов резания, но при изменениях в упругой системе (УС) станка или при выборе другой модели станка. Отличными от справочных данных могут быть силы резания, чистота получаемой поверхности, стойкость инструмента и, конечно, сопровождающие резание многочисленные параметры шума и вибраций.

Причинами возникновения интенсивных автоколебаний при резании металлов могут быть различные физические явления, порой действующие одновременно. В литературе обычно упоминается падающая зависимость силы резания от скорости резания и фазовое отставание изменения силы резания от изменения толщины среза. Однако автоколебания возникают и на скоростях, где отсутствует падающая зависимость силы от скорости, и при выстое (остановке подачи) инструмента, где отсутствуют изменения толщины среза. В работе [3] рассмотрен универсальный механизм возникновения автоколебаний, основанный на присутствии в УС координатной связи и дискретности процесса стружкообразования. Можно предположить, что это наиболее универсальный механизм возникновения интенсивных высокочастотных автоколебаний, которые сопровождаются свистом с высоким уровнем звукового давления, и малозаметных автоколебаний, обязательно присутствующих при резании материалов с поликристаллической структурой.

Проявление координатной связи заключается в том, что под действием силы резания вершина режущего инструмента (РИ) смещается в общем случае не только по направлению действующей силы, но и в перпендикулярном направлении. Это происходит из-за того, что жесткость УС на вершине РИ различна для разных направлений, а главные оси жесткости не совпадают с координатными осями станка. При резании вершина резца находится в условиях всестороннего сжатия, где любые перемещения кроме тангенциального стеснены. Силы, препятствующие движению РИ в ортогональных направлениях, определяются силами реакции со стороны адгезионных мостиков, действующих в окрестности вершины РИ, и силами реакции со стороны материала заготовки и со стороны образующейся стружки, сохраняющей упругие свойства. В момент сдвига элемента стружки разрушаются адгезионные мостики, падают реакции со стороны стружки и детали и нарушается равновесие сил. Вершина РИ устремляется к новому положению равновесия, но не по тангенциальному направлению, а по сложной траектории, имеющей смещение по нормали к поверхности резания. Количество потенциальной энергии, накопленной к моменту сдвига элемента стружки, зависит от условий резания, износа РИ, жесткости УС и т.п. Чем больше накопленной энергии расходуется при сдвиге стружки, тем больше амплитуда колебаний. Та часть потенциальной энергии, которая накопилась за счет деформаций УС по нормали к поверхности резания, будет стремиться создать отклонение траектории вершины от тангенциального направления. Однако интенсивных автоколебаний может и не возникать, если, например, потенциальная энергия расходуется малыми порциями, но с высокой частотой. Так и происходит при образовании сливной стружки. Здесь при единичном сдвиге потенциальная энергия уменьшается не более чем на 30% [4], но сдвиги происходят с высокой частотой. Таким образом, опасность возникновения автоколебаний с большой амплитудой заключается не столько в количестве накопленной энергии, сколько в ее релаксации большими порциями.

В литературе, посвященной проблеме снижения амплитуды колебаний при резании, обычно рассматривают только колебания в плоскости, перпендикулярной оси заготовки (при токарной обработке), полагая, что колебания по оси  $Y$  наиболее сильно влияют на качество поверхности детали. Исследования колебаний вершины РИ с помощью трехкомпонентного акселерометра показали, что с ростом глубины резания или износа РИ чаще опережающими темпами нарастают колебания по осям  $X$  и  $Z$ . При этом колебания по оси  $X$  (оси заготовки) наиболее опасны для чистоты поверхности детали. На рис. 1 показано увеличенное фото валика с диаметром 30 мм. Валик обрабатывался с разной глубиной с фиксацией виброскорости по осям около вершины РИ. С увеличением глубины быстрее росла амплитуда колебаний по оси  $X$ . При таких колебаниях резец стремится врезаться в боковую стенку канавки, создаваемой на поверхности детали вершиной РИ, оставляя небольшие следы. Эти следы, повторяясь от оборота к обороту с фазовым смещением, могут создавать на поверхности детали периодический рисунок. На рис. 1 видны подобные периодические следы на ступени валика, обработанной с наибольшей глубиной. Видно, что с уменьшением глубины шероховатость



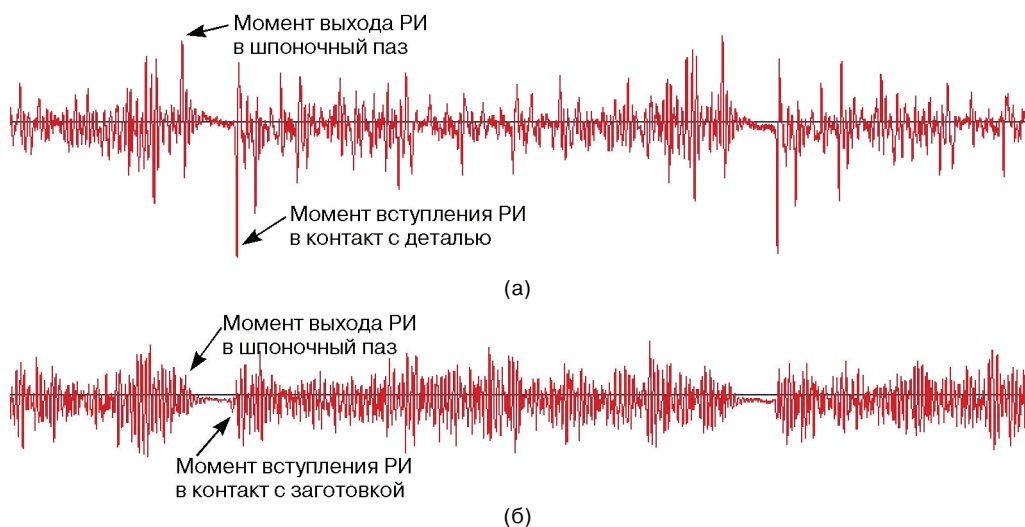
**Рис. 1.** Вид поверхности валика, обработанного с разными глубинами резания

поверхности улучшается. Следует отметить, что на всех ступенях обработки валика резание происходило без признаков интенсивных автоколебаний.

Наиболее полно характер накопленной при резании потенциальной энергии проявляется при быстрой разгрузке РИ, например, при выходе в шпоночный паз.

На рис. 2 показаны примеры записей виброскорости по оси  $X$  при точении валиков, имеющих шпоночные пазы. Выход резца в шпоночный паз ведет к переходу потенциальной энергии в кинетическую, т.е. напоминает момент сдвига стружки. На рис. 2а видно, что выход резца в паз при точении

алюминиевого сплава (в отличие от аналогичной ситуации при обработке мрамора на рис. 2б) сопровождается резким ростом виброскорости по оси  $X$ . При резании мрамора образуется мелкодисперсная стружка, которая не в состоянии удерживать РИ на тангенциальном направлении. Это ухудшает шероховатость поверхности, но исключает возможность возникновения интенсивных автоколебаний. Эксперименты по точению мраморных заготовок показали, что автоколебания не возникают в широком диапазоне изменения глубины резания даже при работе РИ с недопустимым износом.



**Рис. 2.** Примеры записи виброскорости по оси  $X$  при точении валиков со шпоночными пазами из алюминиевого сплава (а) и мрамора (б)

На рис. 3 показан годограф виброскорости вершины резца при выходе в паз на валике из алюминиевого сплава. Видно, что вектор скорости быстро увеличивает составляющую по оси  $X$  (по нормали к поверхности резания при  $\varphi = \pi/2$ ). При обычном сдвиге, образовании сливной стружки, наличии сопротивления стружки и ограничений со стороны поверхности резания это увеличение было бы не столь значительным, но оно обязательно присутствует (см. рис. 2а). После достижения максимума составляющая  $V_x$  начинает уменьшаться, устремляясь к своему минимуму. Частота этих изменений в данном случае близка к одной из собственных частот УС и составляют около 1,5 кГц.

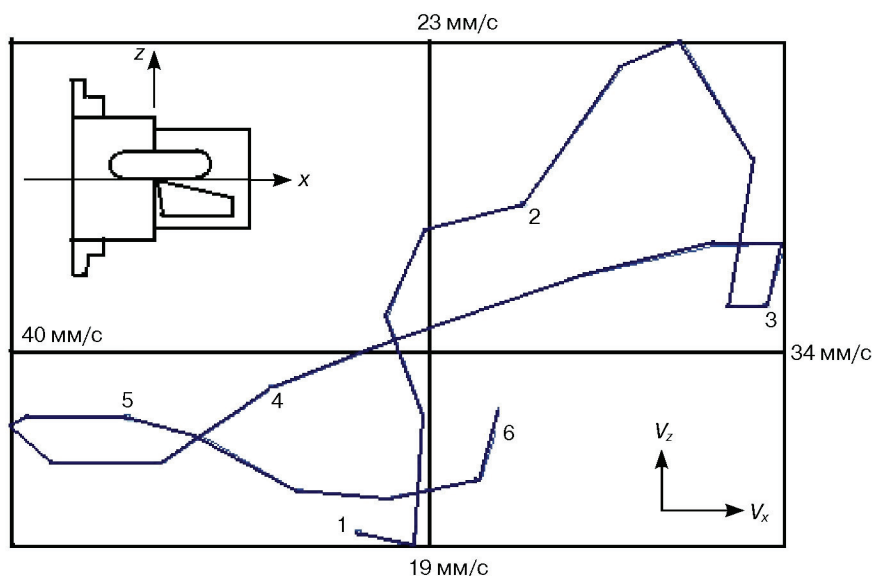


Рис. 3. Годограф виброскорости в момент выхода в шпоночный паз резца при точении валика из алюминиевого сплава

Изменение виброскорости на рис. 3 соответствует режимам с образованием сливной стружки, т.е. спокойным условиям резания. Достижимое значение  $V_x$  за очень короткий промежуток времени (около 0,25 мс) не может значительно отклонить вершину резца от тангенциального направления (достижимое отклонение не превышает 3—4 мкм), но отрыв задней грани инструмента от поверхности резания устраняет адгезионные связи и позволяет новое вступление в контакт инструмента с зоной пластической деформации производить с ударом. При небольших отклонениях от тангенциального направления новый удар ускоряет развитие тангенциальных трещин (надо учитывать, что в зоне первичной пластической деформации сохраняются следы опережающей трещины) в предварительно растянутом и наклепанном материале и, соответственно, облегчает очередной сдвиг элемента стружки. Поскольку при сливной стружке радиальная виброскорость мала относительно скорости резания, скорость и направление удара определяется именно скоростью резания. Фаза радиальных колебаний здесь не имеет большого значения, их роль состоит в разрушении адгезионных связей при разрыве контакта

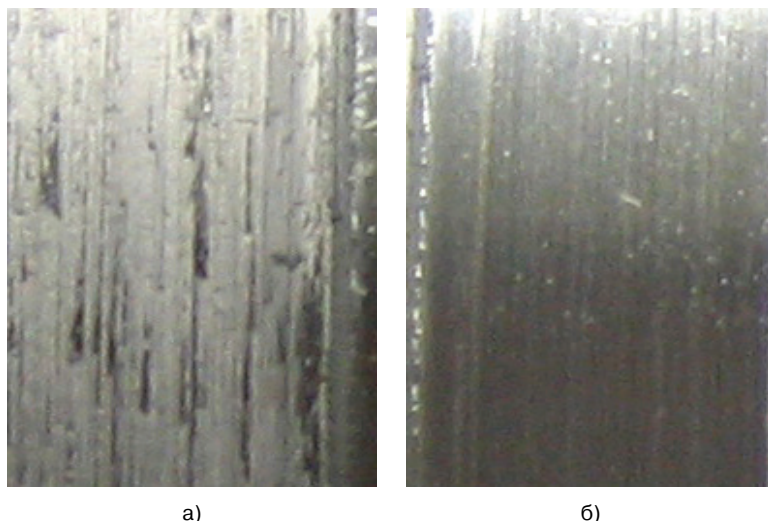
инструмента и заготовки. Угол атаки зоны резания приближен к тангенциальному направлению. Эффективность удара заключается в том, что в связи с ограниченной скоростью распространения упругих и пластических деформаций он позволяет сосредоточить энергию разрушения в месте приложения ударной нагрузки. Описанная ситуация способствует снижению мощности, расходуемой на резание, и может увеличить стойкость инструмента. Похожий эффект наблюдается при применении вибрационного резания.

Однако при возникновении интенсивных автоколебаний амплитуды радиальной скорости и соответствующих смещений могут возрасти в десятки раз. Это ведет к тому, что после очередного сдвига элемента стружки и скачка радиальной скорости положение новой точки контакта вершины инструмента с заготовкой может далеко отстоять от места предыдущего контакта, где располагались наиболее растянутые зерна металла и опережающая трещина [4], затрудняя последующие сдвиги. При этом угол атаки может значительно отклоняться от тангенциального направления, что осложнит образование магистральной трещины для последующего сдвига.

Столь сложное влияние вибраций на эффективность резания дает предпосылки к изучению процесса при наложении на РИ вынужденных колебаний, например, ультразвуковой частоты. Это интересно еще и тем, что в литературе описываются попытки реализации «нанорезания» (резания с толщиной стружки и получаемым дефектным слоем, измеряемыми в нанометрах) с применением ультразвуковых колебаний РИ [5; 6; 7; 8]. Именно здесь реализуются описанные выше условия, когда накапливаемая в УС потенциальная энергия имеет возможность расходоваться малыми порциями, но с высокой частотой, обеспечивая минимальное движение РИ относительно поверхности детали в направлениях, несовпадающих со скоростью резания.

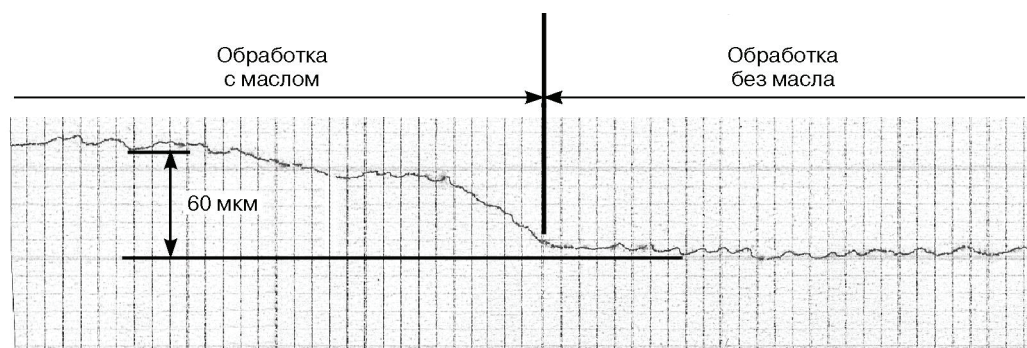
Наложение на РИ тангенциальных вибраций с частотой 22 кГц и амплитудой порядка 10 мкм характеризуется тем, что при скоростях резания до 80 м/мин между передней поверхностью резца и стружкой периодически образуется зазор, разрушающий адгезионные мостики, способствующие образованию нароста. В моменты разрыва связей РИ не совершает скачков, подобных показанным на рис. 3. Вынужденные колебания с высокой частотой и с образованием зазора не позволяют РИ накапливать значительное количество потенциальной энергии, которая релаксирует в каждом цикле открытия зазора малыми порциями с частотой, превышающей частоту сдвигов в сливной стружке. Это позволяет минимизировать фрикционный контакт РИ и обработанной поверхности в направлении, перпендикулярном скорости резания. Сохраняется только скольжение в тангенциальном направлении. Как показывают эксперименты, скольжение по этому направлению тоже может ухудшить качество поверхности. Это связано с тем, что задняя грань РИ может царапать получаемую поверхность и частицы снимаемого материала могут внедряться задней гранью в эту поверхность. На рис. 4 показаны фотографии фрагментов поверхности детали, изготовленной из стали 18ХГТ, обработанной с применением ультразвуковых вибраций РИ. Режущая

пластина была установлена с нулевым задним углом. Резание без применения СОТС не позволило получить идеальную поверхность из-за сохранения ее фрикционного контакта с задней гранью РИ (рис. 4а). Это еще раз подчеркивает тот факт, что вибрации, создающие фрикционный контакт РИ с обработанной поверхностью, ухудшают ее качество. Если такой эффект возникает при тангенциальных колебаниях РИ, то фрикционный контакт в перпендикулярном направлении еще опаснее. На рис. 4б показаны результаты аналогичной обработки, но с введением в зону резания масла «Индустриальное 20», видно, что внешний вид поверхности резко улучшился. Однако введение в зону резания масла не решает всех проблем.

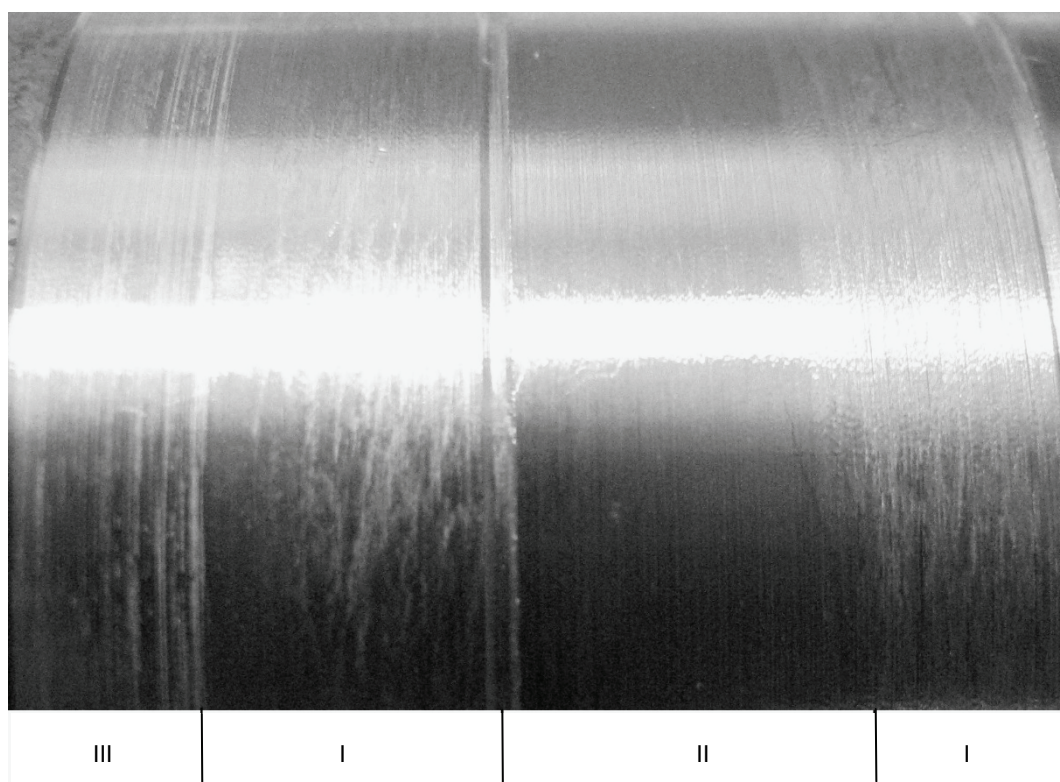


**Рис. 4.** Вид поверхности детали из стали 18ХГТ при обработке с применением тангенциальных вибраций:  
а — без применения СОТС; б — с введением в зону резания масла «Индустриальное 20»

Если радиальная жесткость УС не достаточно высока, то при скольжении по вязкой среде может происходить «всплытие» РИ, смещающего его положение относительно заготовки. На рис. 5 показана профилограмма поверхности медной детали, обработанной с помощью ультразвуковых вибраций РИ. Как видно на рисунке, при введении масла в зону резания происходит перемещение вершины РИ по радиальному направлению на расстояние 60 мкм. Ситуацию меняет увеличение заднего угла РИ. В этом случае увеличивается давление на слой СОТС на обработанной поверхности, что не позволит всплывать РИ. Однако возникает опасность повреждения поверхности самим РИ в процессе колебаний. Кроме того, при возникновении фаски износа по задней поверхности опять возникает опасность всплытия РИ. Задача оптимизации ультразвуковой обработки может дополнительно осложниться возможностью варьирования вязкости и других свойств СОТС. На рис. 6 видно, что при нанесении на поверхность заготовки воды, внешний вид обработанной поверхности заметно улучшился.



**Рис. 5.** Профилограмма поверхности медной детали, обработанной с помощью ультразвуковых вибраций РИ. ВУ = 200, ГУ = 50



**Рис. 6.** Обработка медной заготовки с разными видами СОТС:  
I — обработка без СОТС, II — обработка с водой в качестве СОТС,  
III — обработка с маслом «Индустриальное 20»

### **Выводы**

1. Исследование вибраций при резании различных материалов приобретает новую актуальность в связи с развитием работ в области нанорезания.

2. Применение вибрационного резания с ультразвуковой частотой для реализации технологий сверх прецизионной обработки требует поиска оптимального решения в условиях варьирования многих технологических параметров. Эта работа продолжается в настоящий момент в РУДН и в ЭНИМС совместно.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Кудинов В.А.* Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967.
- [2] *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. — Л.: Машиностроение, 1986.
- [3] *Козочкин М.П.* Виброакустическая диагностика технологических процессов. — М.: Каталог, 2005.
- [4] *Кузнецов В.Д.* Физика твердого тела. Т. 3. — Томск: Красное Знамя, 1944.
- [5] *Venkatesh V.C. and Fang, Fengzhou Z. and Zhang G.X.* Diamond turning of soft semiconductors to obtain nanometric mirror surfaces // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2002), 19 (9). pp. 637—641.
- [6] *Venkatesh, Vasisht C. and Fang, Fengzhou Z.* Diamond Cutting of Silicon with Nanometric Finish // *Annual CIRP* (1998), 47 (1). pp. 45—49.
- [7] *Suzuki N., Nakamura A., Shamoto E., Harada K., Matsuo M., Osada M.* Ultraprecision micromachining of hardened steel by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. *Micromechatronics and Human Science*, 2003. Proceedings of 2003 International Symposium on MHS 2003, 19—22 Oct. 2003. pp. 221—226.
- [8] *Moriwaki T., Suzuki H., Mizugaki J., Maeyasu Y., Higashi Y., and Shamoto E.* Ultraprecision Cutting of Molybdenum by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *American Society for Precision Engineering*, 2004. Proceedings of ASPE 19th Annual Meeting, 24—29 Oct. 2004.

## RESEARCH CORRELATION OF VIBRATIONS AT CUTTING WITH QUALITY OF RECEIVED SURFACE

**M.P. Kozochkin, N.W. Solis**

People's Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

The article is devoted to research of vibration mechanism that has influence in cutting process. This publication is dedicated to ultrasonic machining as means of amplitude regulation of cutting tool autooscillations by means of relaxation with high frequency of potential energy, being accumulated in elastic system while cutting chip. Some examples of oscillation were given by mechanical working of different materials.

**Key words:** vibrations, turning, a roughness of a surface, frequency, amplitude.