

*Сергиев А. П., д-р техн. наук, проф.,  
Владимиров А. А., аспирант,  
Швачкин Е. Г., канд. техн. наук*

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)  
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»*

## К ВОПРОСУ О ВИБРОРЕЗАНИИ

aleksandrvidila@yandex.ru

*Собран литературный обзор исторических источников по теме возникновения и развития вибрационного резания. Описаны основные области применения низкочастотных вибраций инструмента. Рассмотрены конструкции инструмента при резании с автоколебаниями и способы получения автоколебаний. Рассмотрены механизмы для получения низкочастотных вынужденных колебаний инструмента. Представлены наиболее важные результаты проведенных исследований по виброрезанию. Приведены некоторые данные исследований по вибрации режущей кромки инструмента и влиянию задней грани инструмента на условие самовозбуждения вибраций. Сделаны выводы и сформулированы направления исследований по дальнейшему развитию данного направления.*

**Ключевые слова:** *вибрационное резание, автоколебания, труднообрабатываемые стали, тангенциальные колебания, низкочастотные вибрации.*

**Введение.** С развитием техники создаются новые материалы с более высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками. Но с повышением этих характеристик, ухудшаются другие, такие как обрабатываемость. В связи с этим возникает вопрос о наиболее рациональном способе обработки, в частности обработки резанием.

Одним из таких способов является обработка с применением вибрационного резания. Процесс вибрационного резания заключается в наложении на общепринятую кинематическую схему обработки дополнительного вибрационного движения инструмента или заготовки, которое характеризуется направлением, формой, амплитудой и частотой колебаний. Наложение вибраций на инструмент или обрабатываемый материал при сверлении, точении, шлифовании, штамповке и прессовании дает ощутимый физический эффект снижения усилий резания, уменьшения сил трения, облегчает протекание пластических деформаций, увеличивает стойкость инструмента и повышает качество обработки.

Исследование вибрационного резания велось в трех основных направлениях:

- 1) вибрации автоколебательного характера;
- 2) вибрационное резание с низкочастотными вынужденными колебаниями;
- 3) вибрационное резание с ультразвуковыми колебаниями [1].

**Основная часть.** Впервые на автоколебательный характер вибраций при резании металлов было указано в работе Н. А. Дроздова (1937 г.) [2], где автор писал о том, что максимум энергии, идущей на поддержание автоколебаний, поступает в систему в том случае, если сдвиг фаз между колебанием силы резания и

колебанием системы достигает величины  $\psi = 90^\circ$ .

Первые исследования автоколебаний выполнены В. А. Вагиным в 1940 г., использовавшим пустотелые резцы [3]. Конструкция пустотелого резца представляла собой державку с профрезерованным пазом в головной части, к которой газовой сваркой приваривалась специально изогнутая пластинка из быстрорежущей стали. Таким образом, в головке резца получалось отверстие. В остальном геометрия резца ничем не отличалась от обычного проходного резца. За счет пустотелой формы резец, имеет достаточную жесткость для того, чтобы выдерживать большое усилие резания, и в то же время резец обладает хорошими упругими свойствами во время работы, что позволяет ему вибрировать под нагрузкой. Проведенные исследования резания с автоколебаниями показали, что применение пустотелого резца позволило снизить удельное давление на резец и уменьшить количество потребляемой мощности. Дальнейшие исследования, выполнены Л. Б. Эрлихом (1946 г.), который крепил резцы в пружинной оправке типа «гусиная шейка» [4]. В приведенных работах делается вывод, что наличие тангенциальных вибраций приводит к существенному улучшению обрабатываемости резанием, прежде всего к повышению стойкости инструмента, снижению усилий резания и расхода мощности станка. В дальнейших исследованиях, выполненных В. А. Кривоуховым и А. Л. Вороновым (1956 г.), применявшими резцы пониженной жесткости с двухопорной державкой [5], подтверждается существенное снижение усилий резания и уменьшение шероховатости поверхности, вместе с тем установлено, что наличие вибраций в тангенциальном направлении при-

водит к большому снижению стойкости инструмента. На основании этого делается вывод, что использование вибраций автоколебательного характера для облегчения процесса резания носит противоречивый характер и не дает положительного эффекта, что противоречит результатам предыдущих исследований.

Первое авторское свидетельство на способ вибрационного резания с использованием автоколебаний было получено А. М. Безбородовым и В. Н. Подураевым (1960 г.) [6]. По мнению авторов, предлагаемый способ позволил упростить механизм получения колебательного движения резца. Принципиальное отличие конструкции заключалось в изготовлении резцедержателя поворотным и подпружиненным, что в свою очередь устраняет необходимость применения приводного механизма для сообщения резец-изделию вынужденных колебаний. Частота колебаний определялась дополнительной массой и жесткостью пружины, а амплитуда – жесткостью пружины и вылетом вершины резца от оси поворота.

М. Г. Яковлев в статье [7] и Д. М. Фадин и А. В. Шуваев в статье [8] исследовали вибрации режущей кромки инструмента при токарной обработке с автоколебаниями жаропрочных сплавов. Основное внимание в работе было уделено разработке нелинейной динамической модели процесса токарной обработки, описывающей автоколебания инструмента. Авторы выделили три основных гипотезы причин возбуждения автоколебаний инструмента:

- 1) нелинейность характеристик сил резания;
- 2) падающую зависимость коэффициента трения от относительной скорости между стружкой и инструментом;
- 3) регенерация колебаний при движении по следу, образуемому на поверхности резания в процессе предшествующей обработки.

В результате работы была получена нелинейная модель, которая учитывала фрикционные явления, моделировала вибрации режущей кромки инструмента при обработке никелевых сплавов. Отличие нелинейной модели от линейной заключалось в более точном отражении вида вибраций и достаточно точном описании их параметров. Использование разработанной нелинейной модели позволяло моделировать вибрации для технологической системы с различными жесткостными характеристиками на различных режимах резания при обработке различных никелевых сплавов. Расчет вибрационных характеристик процессов резания жаропрочных сплавов при полустационарном точении показал, что жесткость технологических систем не должна

быть меньше  $10^7$  Н/м, так как, при меньшей жесткости возникающие вибрации снижают стойкость инструмента.

Вывод о том, что возникающие автоколебания снижают стойкость режущего инструмента, противоречит утверждению других исследователей [3, 4], о том, что применение вибраций улучшает обрабатываемость труднообрабатываемых сталей и увеличивает стойкость инструмента.

В статье [9] было рассмотрено влияние задней грани режущего инструмента на условие самовозбуждения вибраций при обработке резанием. В работе рассматривалась модель, в которой задняя грань была заменена на дополнительную режущую кромку. В результате рассмотрения были определены параметры, влияющие на условия самовозбуждения колебаний. Работа вспомогательной режущей кромки характеризуется двумя параметрами: геометрическим параметром  $\beta \Rightarrow b$ , определяющим протяженность задней грани, и силовым параметром  $\psi \Leftrightarrow K_{c0}$ , определяющим взаимодействие задней грани с обрабатываемым материалом. Оба эти параметра сводятся в выражении  $(K_{c0} b / V_c)$ , которое называется линейным коэффициентом демпфирования резания. При исследовании модели, выраженной в безразмерной форме, установлено, что изменение параметров  $\beta$  и  $\psi$  в значительной мере влияет на положение и форму областей неустойчивости непрерывного резания при точении и возникновение автоколебаний. Так же было установлено, что учет дробно-рационального закона резания с конечной вариацией жесткости резания позволяет объяснить наблюдаемый на практике факт существования диапазона скоростей резания, в котором вибрации существуют при любой подаче инструмента. Результаты работы могут быть применены для определения условий возбуждения автоколебаний.

Ввиду того, что автоколебания являются нестабильными и неуправляемыми, последующие исследователи отдали предпочтение вынужденным колебаниям.

Идея использования вибраций для улучшения процесса резания выдвинута русским исследователем В. Л. Татариновым и его сподвижниками Н. И. Самокатовым и Д. Н. Дубасовым в 1909 – 1910 гг. [10]. Они применили вынужденные колебания для улучшения обрабатываемости резанием при точении и строгании. Эти вибрации задавались в направлении главного движения периодическими ударами кулачка по консольной части резца с частотой 10 Гц. По окончании исследований авторами сделан вывод о том, что колебания резца облегчают процесс

резания и улучшают условия стружкообразования. Однако, полученные результаты не были доведены до производственных испытаний.

Вновь интерес по промышленному применению вибрационного резания возник в связи с трудностями обработки жаропрочных и нержавеющих сталей карбидного и аустенитного классов. Кинематическое дробление стружки при точении было исследовано Г. М. Рывкиным и Б. М. Самойловым [11], по вибрационному сверлению С. А. Черничкиным [12], М. Н. Улитиным и М. Г. Курицыным [13]. С. А. Черничкин разработал конструкцию механического вибратора шарикового типа, показавшего высокую эффективность при скоростном кольцевом сверлении глубоких отверстий. Колеблущимся звеном являлась обрабатываемая заготовка.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования были выполнены В. Н. Подураевым в МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1956 – 1967 гг. [14]. Основное внимание было уделено применению низкочастотных вибраций для улучшения операций механической обработки, связанных со снятием стружки.

В. Н. Подураев исследовал резание с наложением вибраций по оси  $X$  – в направлении осевой составляющей,  $Y$  – в направлении радиальной составляющей и  $Z$  – тангенциальной составляющей, а также в направлении, не совпадающем ни с одной из этих осей [15].

Наличие вибраций значительных амплитуд в направлении радиальной составляющей отрицательно сказывается на процессе резания – сильно ухудшается шероховатость обработанной поверхности, поскольку перемещение режущей кромки при вибрациях непосредственно фиксируется на обработанной поверхности. Неудовлетворительны в этом случае и условия работы режущей кромки, поскольку большая нагрузка при дополнительном колебательном движении воспринимается вершиной инструмента и вспомогательной режущей кромкой. Результатом этого является повышенный износ и выкрашивание твердосплавных кромок. Поэтому эта кинематическая схема вибрационного резания может найти практическое применение только для колебаний высоких частот типа ультразвуковых.

Исследование надежности стружкодробления, проведенные В. Н. Подураевым, показали, что стружка при вибрационном точении с вибрациями в направлении осевой составляющей надежно дробится при всех частотах, отличных от числа оборотов детали на 5 – 10 % и более. Поэтому резание с колебаниями по оси  $X$  находит применение для дробления стружки. Наряду с этим оно обеспечивает получение удовлетво-

рительной шероховатости поверхности –  $Ra = 3,2 \div 1,6$  мкм, сохранение точности обработки, стойкости инструмента, что и при резании без вибраций в тех же условиях. Основными особенностями вибрационного резания с колебаниями по оси  $X$  являются большое изменение подач (толщины среза) за один цикл колебаний инструмента, а также существенное изменение рабочих углов резания, что в свою очередь положительно влияет на процесс резания. Колебания в направлении осевой составляющей применяются также при вибрационном сверлении, которое дает существенное улучшение обрабатываемости.

Вибрационное резание с тангенциальными колебаниями, т. е. резание с колебаниями в направлении окружной составляющей скорости резания, применялось для существенного повышения производительности обработки и стойкости инструмента при резании труднообрабатываемых материалов. Метод обработки резанием с тангенциальными вибрациями показал положительные результаты как в производственных (вибропилы, виброножницы), так и в лабораторных условиях при точении, развертывании, нарезании резьб [15, 16].

В. Н. Подураев в работах [14 – 16] широко исследовал обработку резанием труднообрабатываемых сталей, как с применением вибраций, так и без них. По мнению автора для стружкодробления на скоростях резания до 200 м/мин и для получения стружки длиной 10 – 20 мм (учитывая усадку) достаточно иметь частоту вынужденных колебаний не более 50 Гц. Для этих целей подходят механические, пневматические и гидравлические вибраторы. Результаты были следующими: при скорости резания 40 м/мин стойкость при обычном точении выше, чем при вибрационном, при этом с увеличением подачи эта разница уменьшалась. При точении с подачей  $S = 0,25$  мм/об стойкость резцов при обычном резании в 3 раза выше, чем при вибрационном, а при подаче  $S = 0,58$  мм/об – только на 30%.

Вибрационное точение нержавеющей стали на высоких скоростях резания (120 м/мин) приводит к существенному повышению стойкости инструмента по сравнению с обычным резанием в тех же условиях, при этом степень повышения стойкости зависит от подачи. При вибрационном точении с подачей 0,25 мм/об имеет место повышение стойкости в 2 раза, при подаче 0,4 мм/об – примерно в 4 раза, при подаче 0,58 мм/об – в 3 раза.

Скорость резания  $v = 80$  м/мин при точении является некоторой критической величиной, определяющей переход из области отрицатель-

ного влияния вибраций в положительную. Действительно, вибрационное точение при подаче 0,25 мм/об приводит к одинаковой стойкости, как при обычном, так и при вибрационном резании. При подаче 0,4 мм/об стойкость при вибрационном точении уже значительно (почти в 2 раза), выше, чем при обычном резании. При повышении подачи до 0,58 мм/об эта разница несколько снижается.

Дальнейшие исследования проводились с целью уточнения оптимальных стойкостных зависимостей, полученных на повышенных скоростях. Зависимость проводилась для двух значений амплитуд – 0,45 мм и 0,2 мм при прочих равных условиях:  $v = 80$  м/мин,  $S = 0,4$  мм/об,  $t = 1,0$  мм,  $f = 175$  Гц. Испытания при большей амплитуде показали снижение стойкости инструмента в 1,5 – 2 раза по сравнению с вибрационным резанием при меньшей амплитуде. Результаты исследований показали, что улучшение обрабатываемости при данной скорости резания обусловлено, прежде всего, частотой, так как сила резания с повышением частоты вибраций снижается.

В работе [17] А. П. Сергиевым и Е. Г. Швачкиным, были проведены исследования по обработке высокомарганцовистой стали аустенитного класса 110Г13Л. Обработка осуществлялась с помощью установки для вибрационного резания с использованием вынужденных гармонических колебаний маятникового типа, на которую впоследствии был получен патент РФ на изобретение № 2212309 [18].

В статье [19] А. П. Сергиевым и Е. Г. Швачкиным более подробно отражены результаты исследований оптимального соотношения параметров колебаний при вибрационном резании. Целью экспериментов являлось определение оптимальных режимов резания и разработка рекомендаций по их назначению.

Исследование режимов чернового вибрационного точения по литейной корке, с глубиной резания  $t$  до 5 мм, продольной подачей  $S = 0,38$  мм/об, скоростью резания  $v = 25$  м/мин, показало, что период стойкости инструмента увеличился на 43 – 57 %. Авторами указано, что ввиду особенностей конструкции установки, получение амплитуды колебаний менее 50 мкм при частоте колебаний 100 Гц, было невозможно. Таким образом, дальнейшее исследование точения по литейной корке не было продолжено, а полученные значения, возможно, не являются предельными.

Исследование чернового вибрационного точения по чистому металлу, при  $t = 2,5$  мм,  $S = 0,38$  мм/об,  $v = 50$  и 70 м/мин, показало, что период стойкости инструмента увеличился на 48

– 67 % при скорости резания 50 м/мин и на 44 – 69 % при скорости резания 70 м/мин.

Исследование чистового вибрационного точения, при  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,1$  мм/об,  $v = 80$  и 100 м/мин, показало, что период стойкости инструмента увеличился на 85 – 106 % при скорости резания 80 м/мин и на 82 – 100 % при скорости резания 100 м/мин.

Многokrратно повторяемые эксперименты показали, что при вибрационном резании с колебаниями маятникового типа высота волнистости находилась в пределах от 0 до 50 мкм. Величина волнистости от предшествующей операции практически не влияет на качество получающейся поверхности при последующей чистовой обработке.

Авторами экспериментально были установлены рациональные режимы резания и параметры колебаний, была подтверждена зависимость параметров колебаний от скорости резания. Максимальный период стойкости наблюдался при вибрационной скорости вершины резца в диапазоне 3,3 – 5,6 % от скорости резания.

В работе [20] М. С. Чепчуровым были проведены экспериментальные исследования параметров механической обработки заготовок с ударной нагрузкой и неоднородным припуском.

За основу была взята работа Е. Г. Швачкина [17] и патент на устройство вибрационного резания [18].

Целью эксперимента являлось определение реальной зависимости мощности подачи ( $N_n$ ) от скорости резания ( $v$ ), величины подачи ( $S$ ) и глубины резания ( $t$ ).

Так же проводились эксперименты по идентификации мощности в цепи привода главного движения оборудования и вибраций в технологической системе при обработке деталей с неоднородным припуском.

В результате экспериментов автором было подтверждено влияние скорости резания на величину механических напряжений в зоне резания и были получены графические зависимости для корректировки технологических режимов. Также исследованиями было подтверждено увеличение стойкости режущего инструмента при обработке с вибрациями.

На основании полученных выводов было разработано устройство для управления вибрациями режущего инструмента при токарной обработке крупногабаритных деталей и получен патент [21]. Устройство было разработано по аналогии с патентом на устройство для вибрационного резания [18], в конструкцию которого был добавлен преобразователь частоты для плавного регулирования частоты колебаний.

Так же была предложена полезная модель, отличие которой заключалось в том, что резцедержатель, установленный на плите на резино-металлических опорах, приводится в движение электромагнитом переменного тока с устройством регулирования частоты и амплитуды, соединенным с ним посредством тяги [22].

Несмотря на большой объем проведенных исследований, в работе не указаны такие характеристики вибрационного резания как амплитуда и частота колебаний.

**Выводы.** Обзор литературных источников по тематике вибрационного резания выявил, что использование низкочастотных колебаний виброрезания в процессах точения труднообрабатываемых материалов является актуальным и в настоящее время. Тема вибрационного резания получит дальнейшее развитие в теме диссертационного исследования: «Оптимизация технологических и конструктивных параметров при вибрационном резании труднообрабатываемых материалов».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Схиртладзе А. Г., Борискин В. П., Макаров А. В.. Проектирование и производство заготовок: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Старый Оскол: ТНТ, 2008. 448 с.
2. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке // Станки и инструмент. 1937. № 22. С. 21 – 25.
3. Вагин В. Мой опыт скоростного резания металла // Советская Сибирь. 1940. 22 марта. № 67. С. 3.
4. Эрлих Л. Б. Резание вибрирующим резцом // Тр. Всесоюз. конф. по станкостроению / Машгиз. Москва, 1946. Ч. 2. С. 120–123.
5. Кривоухов В. А., Воронов А. Л. Высоко-частотные вибрации резца при точении // Труды МАИ, вып. 67. М.: Оборонгиз. 1956. С. 120 – 130.
6. Способ кинематического дробления стружки при токарной обработке за счет использования автоколебаний, возникающих при резании: а. с. 134098 СССР: Кл. 49а 25/02 / А. М. Безбородов, В. Н. Подураев (СССР). – № 663155/25; заявл. 10.04.60; опубл. в Бюл. Изобр. №23. 3 с.
7. Яковлев М. Г. Исследование динамики процесса резания при обработке жаропрочных материалов [Электронный ресурс] // Электронное научно-техническое издание. Наука и Образование: научно-техническое издание. – 2009. – № 8. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/130526.html>.
8. Фадин Д. М., Шуваев А. В. Расчет вибраций режущей кромки инструмента при токарной обработке с автоколебаниями жаропрочных сплавов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 4. С. 57 – 63.
9. Пановко Г. Я. Влияние задней грани режущего инструмента на условие самовозбуждения вибраций при обработке резанием // Вибрация 2014. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. материалов XI международной научно-технической конференции / ЮЗГУ. Курск, 2014. Ч. 1. С. 180 – 206.
10. Татаринов В. Л. Способ улучшения производительности токарных и строгальных резцов путем применения вибрационного движения резца // Вестник общества технологов. 1910. № 4. С. 23 – 26.
11. Рывкин Г. М., Самойлов Б. М. Кинематическое дробление стружки при точении // Станки и инструмент. 1953. № 12. С. 52 – 55.
12. Черничкин С. А. Дробление стружки при сверлении глубоких отверстий // Станки и инструмент. 1959. № 6. С. 22 – 25.
13. Улитин М. Н., Курицын М. Г. Сверление отверстий малого диаметра с применением электромагнитных вибраций. М.: Машиностроение, 1961. 68 с.
14. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
15. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1974. 587 с.
16. Подураев В. Н., Камалов В. С. Физико-химические методы обработки. М.: Машиностроение, 1973. 346 с.
17. Швачкин Е. Г. Повышение периода стойкости инструмента при вибрационном точении высокомарганцовистых сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Швачкин Евгений Геннадиевич. Старый Оскол, 2003. 192 с.
18. Пат. 2212309 РФ, МКИ 7 В 23 В 25/00. Устройство для вибрационного резания / А. П. Сергиев, Е. Г. Швачкин. – № 2001123546/02; заявл. 22.08.2001; опубл. 20.09.2003, Бюл. № 26. 7 с.
19. Сергиев А. П., Швачкин Е. Г. Исследование оптимального соотношения параметров колебаний при вибрационном резании // Вестник машиностроения. 2004. № 5. С. 49 – 53.
20. Чепчуров М. С. Повышение эффективности автоматизированной восстановительной механической обработки крупногабаритных деталей путем идентификации технологических параметров: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Чепчуров Михаил Сергеевич. – Белгород, 2009. 290 с.

21. Пат. 40234 РФ, Устройство для вибрационной обработки крупногабаритных деталей / А. А. Погонин, М. С. Чепчуров, С. В. Старостин. – № 2004109003/22; 29.03.2004; опубл. Бюл. № 22, 2005. 5 с.

22. Пат. 61173. РФ, МПК7 В23В25/00. Устройство для вибрационной обработки на токарных станках / А. А. Погонин, М. С. Чепчуров, А. А. Глуховченко. – № 2006115850/22; заявл. 11.05.2006; опубл. 27.02.2007, Бюл. № 21, 2007. 3 с.

---

**Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Shvachkin E.G.**  
**TO THE QUESTION OF VIBRATION CUTTING**

*Collected a literary review of historical sources according to the topic emergence and development of the vibration cutting. Described basic fields to apply low-frequency vibrations instruments. Reviewed the design of the tool when cutting with self-oscillations and methods for producing self-oscillation. The mechanisms for obtaining low-frequency forced oscillations of the tool. Presentation the most important results carrying out research. Are some of the research data on the vibration of the cutting edge of the tool and the influence of the rear face of the tool on the condition of self-excitation vibration. Made by conclusion and to formulate research directions according to further development given tendency.*

**Key words:** *vibration cutting, autooscillations, difficult-to-cut steel, tangential oscillations, low-frequency vibration.*