

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

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

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

aleksandr vodila@yandex.ru

Вибрационное резание является одним из эффективных методов обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов для изготовления деталей горно-металлургического оборудования. При правильном выборе режимов вибрационного резания способствует повышению стойкости режущего инструмента и обеспечению надежного стружкодробления. При обработке материалов резанием с применением вибраций режущего инструмента, в зоне резания возникают процессы, отличные от процессов, протекающих при обычном точении. Дан краткий литературный обзор работ, описывающих процессы, происходящие в зоне резания. Особое внимание уделено процессу наростообразования и представлена условная схема его появления и удаления с поверхности режущего инструмента. Описан механизм износа режущей кромки, влияние наростообразования на период стойкости инструмента и шероховатость обработанной поверхности. Сформулирована гипотеза, объясняющая физические процессы вибрационного резания при точении. Представлена схема процесса вибрационного резания и сформулированы условия образования нароста и последующего его удаления с вершины инструмента.

**Ключевые слова:** вибрационное резание, наростообразование, период стойкость инструмента, шероховатость поверхности, контактное взаимодействие.

Токарная обработка различных материалов сопровождается возникновением целого ряда явлений в зоне резания, влияющих на сам процесс резания, стойкость режущего инструмента и шероховатость обрабатываемой поверхности, к которым, в первую очередь, относится процесс наростообразования. Как о природе наростообразования, так и о свойствах самого нароста существуют различные мнения. Даже на сегодняшний день наростообразование является одним из проблемных объектов изучения теории и практики механической обработки материалов.

Из ранних работ наибольший интерес представляют исследования [1], где авторы показали, что на образовавшийся нарост действует система внешних сил, нормальных и касательных, а также сил трения и адгезии. При нарушении баланса сил происходит частичное или полное разрушение нароста. Ими была предложена упрощенная схема наростообразования, представленная на рис. 1, включающая в себя пять стадий от начала зарождения нароста до его разрушения и удаления с поверхности режущего инструмента.

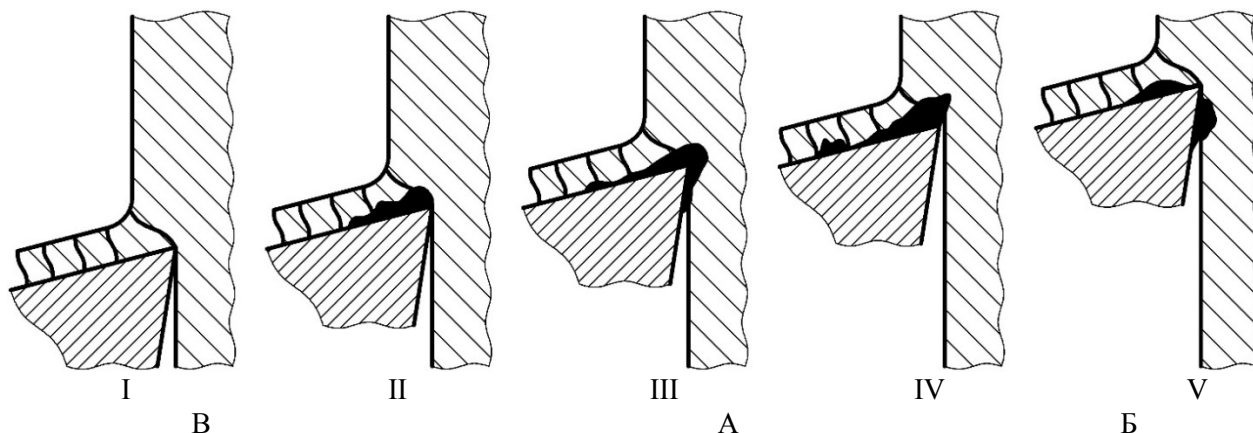


Рис. 1. Стадии формирования нароста

Стадия I характеризуется отсутствием нароста и непосредственным контактом задней поверхности инструмента с поверхностью резания

и передней поверхности со стружкой. В стадии II образуется нарост, который отодвигает контакт стружки с передней поверхностью резца. В

стадии III нарост увеличивается и нависает над задней поверхностью резца, исключая контакт режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью. В стадии IV нарост достигает критических размеров и разрушается. В стадии V происходит сход нароста с передней и задней поверхностей, и цикл повторяется снова.

Такого же мнения придерживались исследователи в статье [2], где они в ходе экспериментов выявили, что обработанную поверхность можно разделить на несколько зон по шероховатости. Зона В – стадия I и II, для которой характерно улучшение шероховатости обработанной поверхности. Зона А – стадия III и IV, которая характеризуется грубой шероховатостью. Зона Б – стадия V, которая характеризуется появлением заусенца на обработанной поверхности (след сорвавшегося нароста). Также авторами было отмечено, что в зоне А устойчивого процесса наростообразования нарост более часто срывается, но время его возникновения незначительно, а время контакта инструмента с поверхностью резания уменьшается.

В работе [3] при использовании модели В. Д. Кузнецова, был исследован процесс наростообразования в условиях сухого внешнего трения. В результате наслаивания на нарост новых слоёв деформированного металла и происходит периодическое отрывание нароста, который остается на цилиндрической поверхности образца в виде комочков. В результате исследований были установлены зависимости числа наростов от давления и скорости скольжения. При увеличении давления в зоне резания число наростов увеличивается, а при увеличении скорости скольжения уменьшается. Зависимость количества наростов от скорости скольжения имеет циклический характер. Представлены результаты исследований по влиянию скорости резания на строение стружки при обработке стали У8А. При значении переднего угла  $\gamma = 25^\circ$  и увеличении скорости резания с 4,5 до 23 м/мин стружка из элементной переходит в сливную, т. е. в материале протекает процесс пластического деформирования.

Таким образом, можно считать установленным циклический характер наростообразования, наличие пяти стадий формирования нароста и обеспечения минимизации шероховатости поверхности в первой и второй стадиях, когда происходит непосредственный контакт обрабатываемой поверхности с задней поверхностью режущего инструмента.

В монографии В. Ф. Боброва [4] обобщены результаты различных исследований по обработке материалов резанием. С помощью скоростной киносъемки было установлено отрица-

тельное влияние нароста на процесс резания. Например, наличие нароста на передней поверхности уменьшает период стойкости режущего инструмента, ввиду его нестабильности и передачи через него на переднюю поверхность резца высокочастотной колебательной нагрузки в процессе резания.

По результатам исследований [5] установлено, двоякое влияние нароста на процесс резания. С одной стороны, он защищает инструмент от изнашивания и облегчает пластическую деформацию, а с другой стороны негативно влияет на процесс резания и способен ухудшить качество обработанной поверхности.

В результате проведенного анализа наиболее значимых исследований наростообразования можно констатировать, что наростообразование является неконтролируемым процессом, создает некоторые трудности при обработке заготовок и обеспечении заданных требований обрабатываемой поверхности, изменяя глубину резания и шероховатость. В результате экспериментов, проведенных В. К. Старковым, по формированию нароста при свободном резании было установлено, что нарост представляет собой сильнодеформированный материал, его твердость в 2,5...3 раза превосходит твердость обрабатываемого материала. Как при прерывистом резании с образованием элементной стружки, так и в условиях непрерывного резания с образованием сливной стружки, нарост не является устойчивым образованием. Тем не менее, периодический характер наростообразования не говорит о том, что нарост не оказывает влияние на процесс резания [6].

В работах [7–9] было исследовано влияние механизма контактного взаимодействия на износ передней поверхности режущего инструмента. Исследования основывались на изучении участков и зон взаимодействия. Было установлено наличие на передней поверхности зон, характеризующих механизмы взаимодействия, происходящие на передней поверхности и определяющие форму лунки износа режущего инструмента. Так же было установлено, что в процессе резания на различных участках существуют принципиально различные механизмы взаимодействия и износа на лунках в середине и по краям зоны контакта. Так в середину лунки технологические среды не проникают, а механизм и интенсивность износа определяются процессами взаимодействия диффузионно-вязкого слоя, образующегося на нижней поверхности стружки, с материалом инструмента. Было установлено, что по краям лунки износ протекает в условиях механического и адгезионного взаимодействия и с участием окислительных процессов. При этом,

технологические среды проникают на края лунки и оказывают влияние на механизм взаимодействия и износ. Так же установлено, что различные механизмы на этих участках определяют форму лунки. Например, при определенных условиях резания на краях лунки износ происходит интенсивнее чем в середине, тем самым образуются седлообразные лунки.

В исследованиях наростообразования и его влияния на период стойкости режущего инструмента, проведенных коллективом авторов [10, 11], наблюдается снижение сил резания при образовании нароста и возможное повышение стойкости режущего инструмента. Но при этом нарост не обладает достаточной прочностью и надежным соединением с передней поверхностью резца. Авторами сделан вывод о том, что ввиду нестабильности нароста, он не обладает ни защитными, ни режущими свойствами.

Отрицательное влияние нароста на период стойкости инструмента и шероховатость обрабатываемой поверхности были подтверждены и в последующих исследованиях [12, 13].

В работах [14, 15] Липатовым А. А. рассмотрен процесс контактного взаимодействия обрабатываемого материала с передней поверхностью резца при переходе от нароста к пластическому контакту с ростом скорости резания при обработке аустенитной стали 12Х18Н10Т. В результате проведенных экспериментов, путем измерения микротвердости контактных слоев стали на микрошлифах корней стружек, было установлено, что с ростом скорости высота нароста уменьшается, а длина его контакта со стружкой увеличивается.

Из анализа приведённых выше работ по наростообразованию можно считать установленным, что процесс наростообразования имеет циклический характер, зависящий от многих факторов: марки обрабатываемого материала, марки режущего инструмента, режимов резания, геометрии поверхности режущего инструмента.

Причём нарост оказывает двойное влияние на процесс резания и период стойкости режущего инструмента.

Самостоятельный интерес представляет процесс образования стружки при резании различных материалов, сопровождающийся определенными явлениями, которые в основном зависят от свойств обрабатываемого материала. Однако, при значительном изменении параметров режима резания или геометрии режущего инструмента процесс стружкообразования претерпевает существенные изменения и становится совсем несвойственным для того или иного обрабатываемого материала.

В работе [16] установлено специфическое явление, связанное с образованием опережающей трещины впереди вершины резца в сталях средней твердости при значительной толщине стружки. Опережающие трещины также наблюдаются у сталей, получивших нормализацию или улучшение и обладающих структурой разрушающейся легче по самим зернам, чем по прослойкам. Для мягких и вязких металлов, наоборот, опережающие трещины не образуются. Отсутствие опережающей трещины также свойственно при резании с высокими скоростями.

Противоположного мнения придерживаются авторы в работе [17], где наличие опережающей трещины не наблюдалось.

Отсутствие единого мнения в вопросе опережающих трещин свидетельствует о том, что эксперименты проводились по разным методикам или не были учтены все влияющие факторы.

С помощью металлографического метода, впервые примененным Я. Г. Усачевым (1912 – 1914 гг.), в элементах стружки удалось обнаружить линии скольжения, являющиеся следами плоскостей скольжения, по которым происходит скольжение частиц металла внутри элементов (рис. 2).

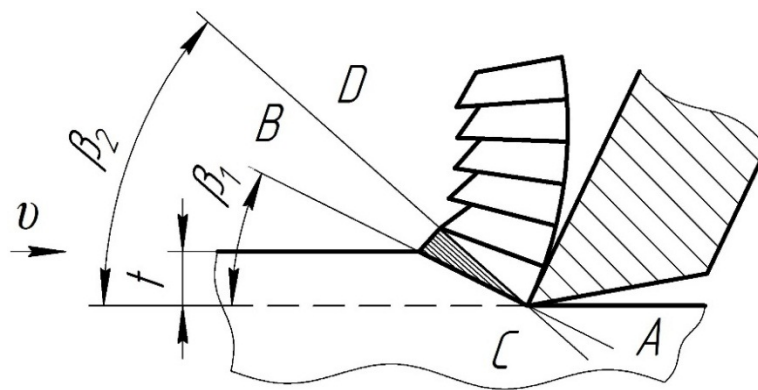


Рис. 2. Схема образования стружки (по Я. Г. Усачеву)

$t$  – глубина резания,  $v$  – скорость резания,  $\beta_1$  – угол сдвига (скальвания),  $\beta_2$  – угол плоскости скольжения, АВ – плоскость сдвига (скальвания), CD – плоскость скольжения

Последующие исследования, проведенные под руководством профессора А. М. Розенберга [17], подтвердили наличие линий скольжения, обнаруженных Я. Г. Усачевым. Также в результате исследований было установлено, что углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  увеличиваются с увеличением переднего угла, глубины и скорости резания, что является неотъемлемой частью процесса стружкообразования.

В работе [18] авторы также указывают на появление опережающей трещины, но характер

трещины таков, что при распространении ее вверх она переходит в плоскость сдвига.

Дальнейшие исследования по образованию опережающей трещины были продолжены в статье [19]. По результатам исследований было установлено, что концентрация напряжений возле режущей кромки в зависимости от механических свойств материала приводит к двум типам разрушений: образованию пластической зоны в направлении 1 и опережающей трещины в направлении 2 (рис. 3).

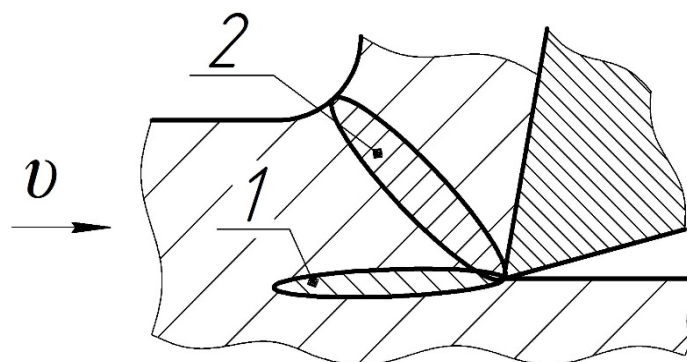


Рис. 3. Зоны возможных разрушений

1 – зона разрушения упругопластичных материалов, 2 – зона разрушения хрупких материалов

Экспериментально зафиксировано [19], что при соприкосновении режущего инструмента с обрабатываемым металлом у его вершины, независимо от свойств обрабатываемого материала, создается концентрация напряжений. Моделирование с помощью метода конечных элементов показало, что дальнейшее развитие сжимающих усилий не вызывает качественных изменений в деформационном поле. Увеличивается только зона и степень пластических деформаций, но процесс сжатия к стружкообразованию не приводит. Предположительно для зоны 1 преобладает деформация изгиба, способствующая отрыву припуска металла в месте ослабления концентраций напряжений. Для зоны 2 стружка при изгибе разрушается у основания «консоли», в этом случае происходит сдвиг стружки по поверхности сдвига.

Установлено, что чем больше размер пластической зоны, тем больше изгибающий момент стружки. При этом образующийся рычаг снижал силы, необходимые для разрушения обрабатываемого материала. Если преобладает работа изгиба, то стружкообразование происходит при разрушении припуска вдоль поверхности резания в зоне 1, последующий сдвиг вдоль области разрушения и циклическое повторение этих действий приводит к образованию элементной стружки. Для хрупких материалов после образования трещины у вершины лезвия, незначительный изгиб возникшей консоли завершается изломом, образуется стружка надло-

ма. Авторы в работе не исключают, что при хрупком разрушении наблюдаются предварительные пластические деформации, что соответствует теории разрушения Степанова, и наоборот, при разрушении пластичных материалов проявляются механизмы, свойственные хрупким материалам, связанные с упрочнением, деформированием кристаллических решеток и концентрацией дислокаций [19].

В работе [20] исследован процесс элементного стружкообразования при обработке резанием жаропрочных сталей при скоростях до 50 м/мин. Исследования показали, что появление адиабатической полосы сдвига на высоких скоростях резания увеличивает износ инструмента, оказывая влияние на качество обрабатываемой поверхности, но с другой стороны, это явление обеспечивает получение элементной стружки. Было установлено, что переход из сливной стружки в элементную также возможен при увеличении глубины резания и уменьшении переднего угла режущего инструмента, причем такой переход нехарактерен для конструкционных сталей и многих цветных металлов и сплавов.

В работе [21] было исследовано стружкообразование в условиях сверхвысоких скоростей резания. Целью исследования являлось определение наличия или отсутствия оплавления поверхностного слоя стружки при контактом взаимодействии с передней поверхностью резца. В результате было предложено две гипотезы. При наличии оплавления механические свойства ма-

териала соответствуют механическим свойствам расплава. При отсутствии оплавления механические свойства сохраняются. По мнению авторов, наличие оплавления резко снижает сопротивление пластическому деформированию.

Известны исследования, рассматривающие стружкообразование с точки зрения атомно-дислокационного подхода, а процесс наростообразования предлагается рассматривать как результат адгезии в областях высокого давления [22]. В результате исследования процесса резания авторами было сделано предположение, что с ростом скорости резания силы резания и степень пластической деформации срезаемого слоя будут снижаться с одновременным формированием ячеистой дислокационной структуры. При этом формирование микротрещин происходит путем разрыва межатомных связей и образованием хрупкого скола.

Другой подход к изучению явлений в зоне резания был исследован В. Н. Подураевым в МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1956 – 1967 гг. [23]. Было исследовано вибрационное резание на низких частотах (до 200 Гц). Автором отмечено, что резание с вибрациями низкой частоты, направленными нормально к поверхности резания, приводят к количественным изменениям условий стружкообразования и способствуют дроблению стружки.

Результаты экспериментальных исследований показали, что за счет вибрационного резания происходит изменение свойств обрабатываемого материала и условий резания, тем самым изменяя процесс стружкообразования. Выражение этого явления наблюдается в появлении в сливной стружке трещин, которые охватывают часть ее толщины, а при пересечении трещинами всей толщины – образуется стружка скалывания. Возникновению трещины сопутствует значительная концентрация напряжений в контактной зоне, что способствует дальнейшему развитию трещины при меньшем силовом воздействии. При наличии усилия, достаточного для развития трещины, образуется элементная стружка, в противном случае образуется сливная стружка. Таким образом, было установлено, что поверхность разрыва при переходе от сливной стружки к элементной изменяет направление от положения параллельного направлению движения резания к перпендикулярному, направленному вверх к обрабатываемой поверхности.

Из результатов многочисленных исследований вибрационного резания, представленных иностранными учеными [24], можно считать установленным, что применение вибрационного резания, ввиду прерывистого контакта, обеспечивает отсутствие наростообразования, улучша-

ет отвод стружки и повышает стойкость инструмента.

Результаты исследований периода стойкости инструмента при обработке высокомарганцовистой стали аустенитного класса 110Г13Л, выполненных А. П. Сергиевым и Е. Г. Швачкиным [25], показали высокую эффективность обработки, осуществлявшейся с помощью установки для вибрационного резания с использованием вынужденных гармонических колебаний маятникового типа (патент РФ на изобретение № 2212309 [26]).

Исследование режимов чернового вибрационного точения по литейной корке при скорости резания  $v = 25$  м/мин показало, что период стойкости инструмента увеличился на 43 – 57 %. Исследование чернового вибрационного точения по чистому металлу 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 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.

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.

Исследования влияния вибраций на процесс резания при точении труднообрабатываемых материалов были продолжены в работах [27, 28]. В ходе исследований было установлено, что повышение стойкости режущего инструмента обуславливается влиянием в зоне резания совокупным воздействием, которое включает в себя три основных фактора: виброскорость, периодически суммируется и вычитается из скорости резания, вибрационное ускорение, влияющее на величину силы резания, и энергию рассеивания, влияющую на температуру в зоне резания.

В работе [29] представлены результаты экспериментов по точению конструкционных сталей с наложением на подачу инструмента асимметричных негармонических колебаний, предназначенных для надежного стружкодробления. Наложение колебаний, в направлении подачи с различными коэффициентами асимметрии, осуществлялось с помощью специального гидромеханического устройства. На скорость резания такой тип колебаний влияния не оказывает, но обеспечивает стружкодробление и препятствует наростообразованию.



Приняв за основу схему, предложенную Н. В. Талантовым [8], заменим неподвижный резец на резец, совершающий маятниковые колебания,

которые влияют на тангенциальную и нормальную составляющие силы резания, получим схему (рис. 4).

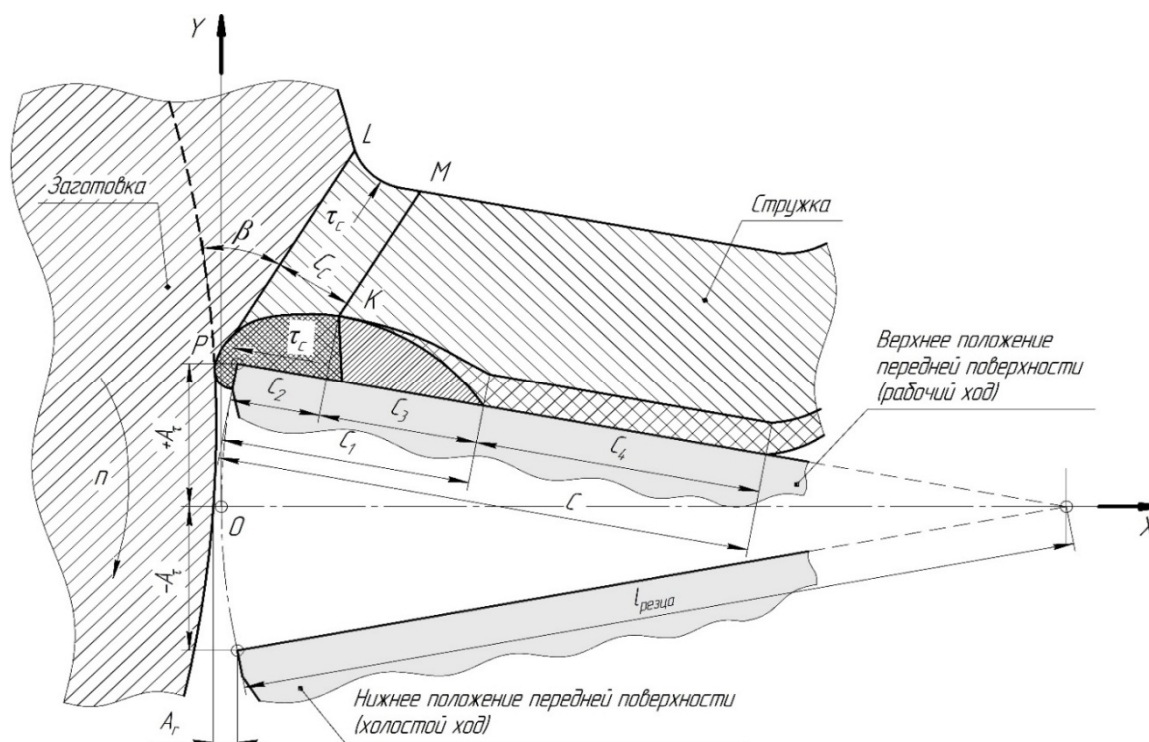


Рис. 4. Схема вибрационного резания при точении:

$\tau_c$  – сопротивление пластическому деформированию,  $\beta$  – угол сдвига, PL – начальная граница зоны стружкообразования, KM – конечная граница зоны стружкообразования,  $C_c$  – размер толщины зоны стружкообразования, C – общая длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента,  $C_1$  – участок пластического контакта,  $C_2$  – участок упрочнения пластического контакта (зона контакта, отвечающая за износ резца по задней поверхности),  $C_3$  – участок разупрочнения пластического контакта из-за выделения тепла в зоне резания (зона контакта, отвечающая за износ резца по передней поверхности),  $C_4$  – участок вязкого контакта,  $l_{резца}$  – вылет резца относительно оси качания,  $+A_t$  – положительная тангенциальная составляющая вибрационного резания,  $-A_t$  – отрицательная тангенциальная составляющая вибрационного резания,  $A_r$  – нормальная составляющая вибрационного резания

Анализируя представленную схему (рис. 4), правомерно выдвигать гипотезы о том, что при нахождении резца в верхнем положении, нарост сохраняется на вершине резца, что в свою очередь защищает от износа и ухудшает шероховатость обрабатываемой поверхности. Но при движении резца в нижнее положение, за счет сил трения, возникающих между обрабатываемой поверхностью заготовки и поверхностью нароста, происходит его отрыв с вершины резца, отдых и охлаждение инструмента, за счет выведения режущей кромки из зоны резания.

Выдвинутое предположение об отрыве нароста с вершины резца подтверждается визуальным осмотром экспериментальных образцов [27]. При сравнении обработанных поверхностей образцов из стали 12X18H10T, полученных точением с вибрациями и без вибраций при скоростях резания 55 и 70 м/мин, было отмечено положительное влияние вибраций на шероховатость поверхности. При наложении колебаний на режущий инструмент количество заусенцев

на обработанной поверхности, которые являлись следами сорванного нароста, выявленными исследователями в работе [2], уменьшалось примерно в 2...4 раза, в зависимости от интенсивности колебаний. На результаты измерений шероховатости поверхности наличие заусенцев, в виде сорванного нароста, значительного влияния не оказывает.

Правомерно предположить, что если период колебаний меньше времени формирования нароста, чем стадии его образования по задней поверхности, то нарост будет отрываться при каждом цикле колебаний, что обеспечивает получение стабильных параметров шероховатости поверхности. При этом эффект наблюдается, если выполняется условие, при котором вибрационная скорость ( $A \cdot \omega$ ) больше скорости резания ( $v$ ), соответственно, чем больше разница, тем интенсивнее происходит процесс срыва нароста с передней поверхности резца.

Этот факт позволяет предположить, что процесс стружкообразования при вибрационном

резании схож с процессом стружкообразования при резании со сверхвысокими скоростями. Что в свою очередь подтверждается цифровыми фотографиями фрагментов стружки (рис. 5), полу-

ченными при обработке стали 12X18H10T. Резание производилось при скорости  $v = 82$  м/мин, подаче  $S_0 = 0,26$  мм/об, глубине  $t = 0,5$  мм.

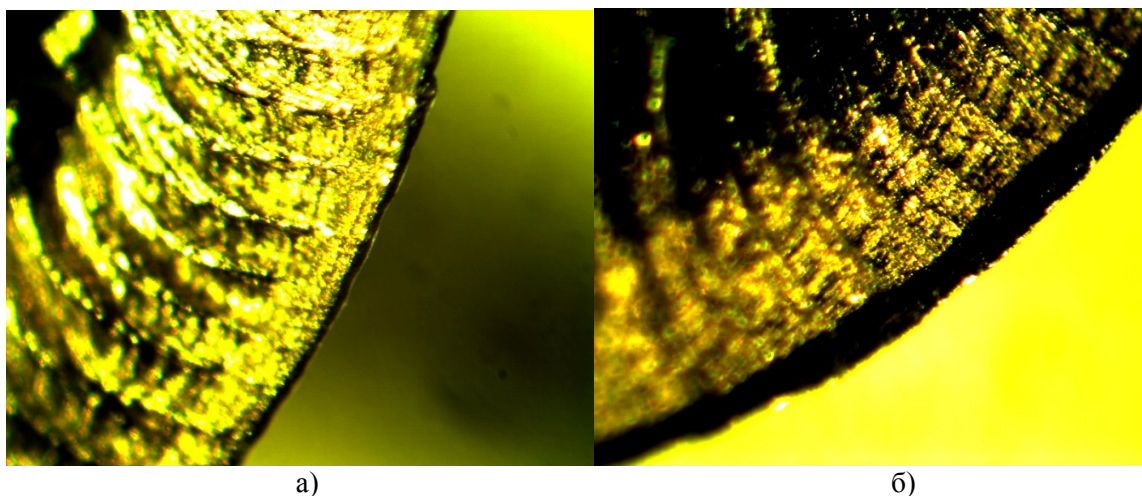


Рис. 5. Фотографии фрагментов стружки:

а – при резании без вибраций; б – при вибрационном резании ( $A = 5 \dots 10$  мкм;  $f = 5 \dots 10$  Гц)

Из представленных фотографий (рис. 5) очевидно, что величина оплавления при резании с вибрациями и без отличается. Визуально, величина оплавления кромки стружки при резании с вибрациями примерно в 2...3 раза больше, чем без вибраций

Если рассматривать процесс резания с вибрациями в тот момент, когда резец осуществляет движение из нижнего положения в верхнее, правомерно предположить, что за счет воздействия вибрационной скорости на обрабатываемый материал в зоне резания, путем суммирования скорости резания и вибрационной скорости, процесс резания происходит со сверхвысокими скоростями. Это предположение подтверждается фотографиями полученных стружек.

На основании проведенного анализа наиболее значимых исследований физических явлений, протекающих в зоне резания, можно сформулировать влияние основных факторов на целевую функцию, характеризующую оптимизацию технологических параметров резания:

- применение вибрационного резания для обработки труднообрабатываемых материалов позволяет расширить диапазон скоростей резания и повысить период стойкости инструмента;

- применение вибрационного резания для обработки труднообрабатываемых материалов позволяет улучшить качество обрабатываемой поверхности заготовки за счет снятия нароста с передней поверхности режущего инструмента до его образования на задней поверхности, тем самым обеспечивая постоянный контакт задней поверхности режущего инструмента с поверхностью обрабатываемой заготовки и стабильную шероховатость поверхности;

- периодическое вибрационное воздействие на процесс резания, т. е. суммирование и вычитание вибрационной скорости из суммарной

скорости резания, изменение по периодическому закону силы резания и степени пластических деформаций срезаемого слоя, отсутствие оплавления обрабатываемого материала при контакте с передней поверхностью резца создает условия для появления опережающей трещины, обеспечивающей дробление стружки;

- вибрационное резание вязких и пластичных материалов позволяет создавать условия, при которых исчерпывается запас пластичности обрабатываемого материала, в результате чего материал разрушается с образованием элементной стружки;

- применение вибрационного резания полностью изменяет механизм износа и уменьшает его интенсивность за счет прерывания процесса взаимодействия диффузионно-вязкого слоя с материалом инструмента, повышает период стойкости инструмента, благодаря возможности отдыха режущей кромки за счет ее выведения из зоны резания в момент обратного хода резца при условии превышения виброскорости над скоростью резания.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грановский Г.И., Грудов П.П., Кривоухов В.А., Ларин М.Н., Малкин А.Я. Резание металлов. М.: Изд. Машгиз, 1954. 472 с., ил.
2. Древаль А.Е., Лужанский М.С. Наростообразование и работоспособность режущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №12. С. 3–7.

3. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. Вузов. М.: Изд. Высш. Шк., 1985. 304 с., ил.
4. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М.: Изд. Машиностроение, 1975. 344 с.
5. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Изд. Машиностроение, 1989. 296 с.
6. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Изд. Машиностроение, 2009. 640 с.
7. Талантов Н.В., Козлов А.А. Механизм взаимодействия стружки с передней гранью инструмента // Известия вузов. Машиностроение. 1976. № 3. С.147–150.
8. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Изд. Машиностроение, 1992. 240 с.
9. Полянчиков Ю.Н., Пахтусов С.М., Солодков В.А., Черемушников Н.П., Кумаков А.В., Крайнев Д.В. Влияние механизма контактного взаимодействия на износ передней поверхности инструмента // Известия ВолгГТУ. 2004. №9. С. 42–44.
10. Astakhov V.P., Shvets S.V., Osman M.O. M. Ship structure classification based on mechanics its formation // Materials processing Technology. 1997. Vol. 71/2. P. 247–257.
11. Astakhov V.P., Shvets S.V., Osman M.O. M. The Bending Moment as the Cause of Chip Formation // Manufacturing Science and Engineering. Proceedings of the ASME international mechanical engineering congress & exposition. 1997. Vol. 12. P. 53–60.
12. Емельянов С.Г., Яцун Е.И., Шве́ц С.В., Ремнев А. И., Павлов Е. В. Влияние образования наростов при точении на стойкость и качество обработанной поверхности // Технология машиностроения. 2011. №9. С. 30–34.
13. Яцун Е.И., Шве́ц С.В., Ремнев А.И. Исследования образования наростов при резании металлов / Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Международной научно-технической конференции: в 2 частях // Юго-Зап. гос. ун-т. (Курск, 28 декабря 2010 г.), Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2011. Ч.2. С. 125–132.
14. Липатов А.А. Работоспособность титанотанталовых твердых сплавов при резании труднообрабатываемых материалов // Известия ВолгГТУ. 2006 №2. С. 33–35.
15. Липатов А.А. Особенности перехода от наростообразования к взаимодействию с пластическим контактом при обработке аустенитной стали // Известия ВолгГТУ. 2013. Т. 9. №7 (110). С. 31–34.
16. Панкин А.В. Обработка металлов резанием. М.: Изд. Машгиз, 1961. 520 с.
17. Рубинштейн С.А., Левант Г.В., Орнис Н.М., Тарасевич Ю.С. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент. М.: Изд. Машиностроение, 1968. 392 с.
18. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. Изд. 3-е, перераб. и доп. Учебник для машиностроительных техникумов. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.
19. Яцун Е.И., Емельянов С.Г., Ремнев А.И., Шве́ц С.В. Механизм стружкообразования при резании металлов // Технология машиностроения. 2012. №5. С. 9–14.
20. Ласуков А.А., Чазов П.А., Барсук А.В. Изучение процесса элементного стружкообразования при резании труднообрабатываемых материалов / Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов V Международной научно-практической конференции: в 2-х т. // Юргинский технологический институт. (Юрга 22–23 мая 2014 г.), Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. Т.1. С. 290–294.
21. Корнеева В.М., Корнеев С.С. Разработка модели процесса стружкообразования в условиях сверхвысоких скоростей резания // Технология машиностроения. 2014. №11. С. 54–58.
22. Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М., Серый С.В. Атомно-дислокационный подход к процессу резания металлов // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2013. №4 (101). С. 189–198.
23. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Изд. Машиностроение, 1970. 350 с.
24. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. М.: Машиностроение, 1985. 424 с., ил.
25. Швачкин Е.Г. Повышение периода стойкости инструмента при вибрационном точении высокоуглеродистых сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Швачкин Евгений Геннадиевич. – Старый Оскол, 2003. 192 с.
26. Пат. 2212309 Российская Федерация, МКИ 7 В 23 В 25/00. Устройство для вибрационного резания / А. П. Сергиев, Е. Г. Швачкин; заявитель и патентообладатель А. П. Сергиев, Е. Г. Швачкин. – № 2001123546/02; заявл. 22.08.2001; опубл. 20.09.2003, Бюл. № 26. – 7 с.
27. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В., Швачкин Е.Г. Особенности стружкообразования при чистовом вибрационном точении стали 12Х18Н10Т // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и



производство: Сб. ст. по материалам XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, (Старый Оскол, 23–25 ноя. 2016 г.), Старый Оскол: Изд-во СТИ НИТУ МИСиС, 2016. Т. 1. С. 285–288.

28. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Швачкин Е.Г. Влияние параметров виброрезания на период стойкости инструмента // Фундамен-

тальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. №5 (319). С. 96–101.

29. Шелег В.К., Данильчик С.С., Точение конструкционных сталей с наложением на подачу инструмента асимметричных колебаний // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 11. С. 2–7.

---

**Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V., Shvachkin E.G.**

**PHYSICAL PRINCIPLES OF VIBRATION CUTTING IN TURNING**

*The vibrating cutting is one of the effective methods of processing workpieces of hard materials for the manufacture of parts of mining and metallurgical equipment. With proper selection of the vibration modes of cutting improves durability of the cutting tool and to ensure reliable chip control. When machining materials using a cutting tool vibration in the cutting area there are processes other than the processes occurring in the normal turning. A brief literature review of studies describing the processes occurring in the cutting zone. Particular attention is paid to the process and built-up edge is a schematic diagram of its occurrence and the removal from the surface of the cutting tool. The mechanism of the cutting edge wear, impact durability during the built-up edge on the tool and the machined surface roughness. A hypothesis to explain the physical processes of cutting vibration during turning. A scheme of the process of cutting vibration and formulated conditions for the formation of build-up and its subsequent removal from the tool tip.*

**Key words:** vibration cutting, built-up edge, during the tool life, surface roughness, contact interaction.

---

**Сергиев Аркадий Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

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

Адрес: Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42.

E-mail: tomm\_sti\_misis@mail.ru

**Владимиров Александр Андреевич**, аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

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

Адрес: Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42.

E-mail: aleksandr vodila@yandex.ru

**Макаров Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

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

Адрес: Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42.

E-mail: makarov.av@mail.ru

**Швачкин Евгений Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта.

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

Адрес: Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42.

E-mail: eshvachkin@mail.ru