

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.9.02.004

**М. П. КОЗОЧКИН, Ф. С. САБИРОВ, А. Н. ПОПИКОВ****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТВЕРДОГО ТОЧЕНИЯ**

Представлены результаты исследований изменения виброакустических сигналов от момента врезания до выхода режущей кромки из зоны резания при точении закаленных сталей. Анализируются вопросы распределения тепловых потоков при твердом точении, влияние на эти потоки материала подложки под режущей пластиной, вопросы диагностики состояния инструмента по виброакустическому сигналу. *Твердое точение; виброакустический сигнал; диагностика инструмента; тепловые потоки при резании*

Твердая обработка, то есть обработка материалов с твердостью выше 47 HRC, уже перестала быть чем-то необычным. Технология твердой обработки уже включена в практику производства на ряде машиностроительных предприятий. Функциональный принцип твердого точения (ТТ) заключается в нагреве обрабатываемого материала в зоне контакта с режущей кромкой до температуры 1400–1600°C. Правильно подобранная геометрия инструмента и режимы резания позволяют нагревать обрабатываемый материал за счет тепла, выделяющегося в процессе пластической деформации, что приводит к его местному отпуску до твердости, как предполагают, около 25 HRC. Максимальные температуры возникают в зоне первичных пластических деформаций. Основное тепло отводится стружкой, а обрабатываемая поверхность и инструмент нагреваются незначительно. После отделения стружки происходит быстрое охлаждение материала, что приводит к уменьшению окончательной твердости не более чем на 2 единицы.

**1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

Перечисленные особенности ТТ определяют требования к геометрии режущего инструмента, к жесткости упругой системы станка и режимам резания и т. п. Однако более подробных описаний исследований ТТ в литературных источниках трудно найти. Наибольший интерес представляет развитие процесса отпуска обрабатываемого материала при врезании режущего инструмента. Ведь врезание происходит в закаленный материал, и от скорости отпуска зави-

сит и целостность режущей кромки, и чистота поверхности. Данные об отпуске в зоне резания можно оценить только косвенными путями по средней температуре в зоне резания, которая меняется и во времени и в объеме деформируемого материала. Температура в зоне пластических деформаций может зависеть от обрабатываемого и инструментального материалов, от режимов резания, от геометрии режущей кромки, от материала подложки, от жесткости упругой системы станка и от его виброакустической активности и ряда других факторов, влияние которых трудно оценить.

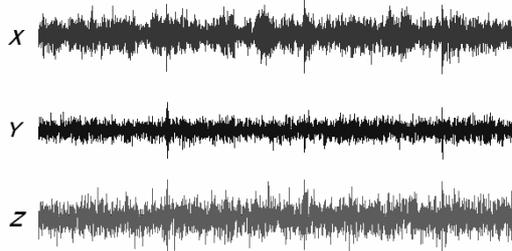
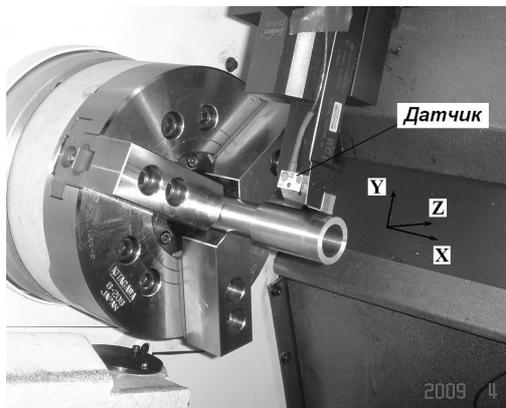
**2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В процессе проводимых исследований ТТ был применен контроль виброакустических (ВА) сигналов, сопровождающих процесс ТТ от момента врезания и до выхода из зоны резания. Как известно [1], ВА сигналы (особенно его высокочастотные составляющие) при резании и трении во многом определяются относительной скоростью в контакте и величиной наименьшей твердости в паре контакта. По отношению к ТТ это твердость поверхности заготовки. Опираясь на монотонный рост амплитуды ВА сигнала при увеличении твердости, можно наблюдать переходные процессы при врезании в заготовку и оценивать ход процесса отпуска поверхности.

Для организации подобных наблюдений акселерометры располагались в различных точках упругой системы, включая и сам режущий инструмент. При этом варьировались и режимы резания, и износ инструмента, и материал подложки под режущими пластинами.

На рис. 1 показана фотография зоны резания с трехкомпонентным акселерометром, установленным на резце. Снизу показан пример

сигналов виброускорения, регистрируемых по каждой координатной оси.



**Рис. 1.** Резец с 3-х компонентным датчиком абсолютных колебаний и пример сигналов, регистрируемых с его помощью

В табл. 1 показаны эффективные (СКЗ) и максимальные значения ВА сигнала в разных частотных диапазонах при разных скоростях резания при врезании в заготовку и при самом резании. В работе [1] показывается, что амплитуда высокочастотных составляющих ВА сигнала при трении приблизительно пропорциональна относительной скорости в контакте и минимальной твердости в паре. Наибольший частотный диапазон, показанный в табл. 1, выше 5,6 кГц. Скорость в контакте нам известна, но твердость материала заготовки меняется под

влиянием температуры резания, которую можно оценить, приведя данные табл. 1 к одной скорости.

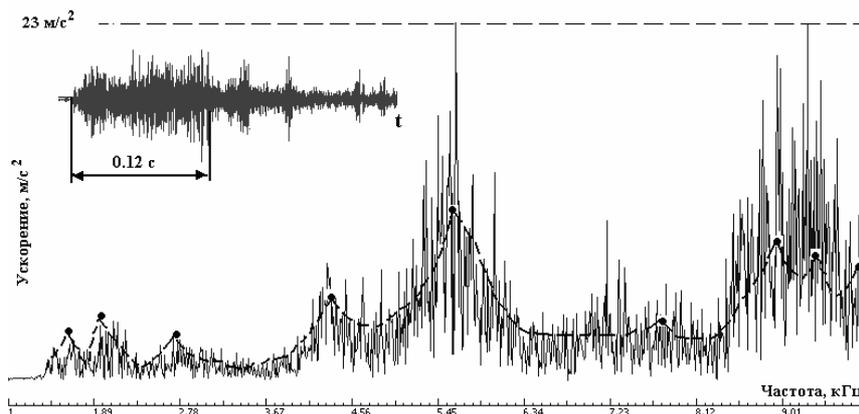
### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для приведения к одной скорости, например, к 250 м/мин, надо показания при большей скорости уменьшить во столько же раз, во сколько было превышение скорости по сравнению с 250 м/мин. Для меньших значений скорости надо, наоборот, увеличить полученные значения. После этой операции ускорение в диапазоне более 5,6 кГц будет для скорости 125 мин – 7,6 м/с<sup>2</sup>, для 250 м/с<sup>2</sup> – 5,2 м/с<sup>2</sup>, а для 500 м/с<sup>2</sup> – 3,4 м/с<sup>2</sup>. Это означает, что при скорости 500 м/мин твердость поверхности заготовки была на треть ниже по отношению к скорости 250 м/мин, а при 125 м/мин – на 46% выше по отношению к скорости 250 м/мин. При скорости 500 м/мин переходный процесс протекает значительно быстрее. Средняя твердость поверхности за период врезания здесь почти в 4 раза ниже, чем при врезании на скорости 250 м/мин.

На рис. 2 показан спектр виброускорения по оси X при врезании в закаленную до 55 HRC заготовку инструментом с острой кромкой при скорости 250 м/мин. Пунктиром на рисунке показан контур спектра, возникающего после окончания переходного процесса и возникновения устойчивого резания. На верхней части рис. 2 показан вид ВА сигнала в процессе врезания в заготовку. Переходный процесс протекает в этом случае за 0,12 с, а заготовка успевает сделать более одного оборота. Этого может оказаться достаточно для выкрашивания режущей кромки и недопустимого снижения качества участка поверхности.

Таблица 1  
Максимальные и эффективные значения ВА сигнала при разных скоростях резания, в разных частных диапазонах, м/с<sup>2</sup>  
(сталь 40X – ВОК 60, подача 0.24 мм/об, глубина резания 0.15 мм)

Частотный диапазон, кГц	Менее 1 кГц			1,0 – 1,4 кГц			1,4 – 2,8 кГц			2,8 – 5,6 кГц			Более 5,6 кГц			
	125	250	500	125	250	500	125	250	500	125	250	500	125	250	500	
Скорость резания, м/мин	СКЗ	11,2	6,6	3,6	4,6	0,5	0,5	4,5	7,7	3,5	6,1	7,4	4,2	11,7	27,4	12,3
	Мах	18	27,5	8,5	16,7	1,5	1,5	18	30	12	20	29	15			
При резании	СКЗ	7,3	7,2	8,6	1,6	0,5	0,5	1,3	1,6	3,9	1,8	1,5	3,1	3,8	5,2	6,8
	Мах	10,2	15,7	22	10,7	1,2	2,2	8,8	15,8	22	12,5	16	17,2			



**Рис. 2.** Спектр ВА сигнала при врезании острого резца в закаленную поверхность. Пунктиром показаны контуры того же спектра, но после окончания переходного процесса. В верхней части показана запись ВА сигнала по оси  $X$  при врезании

Время переходного процесса и амплитуда сопровождающего его ВА сигнала существенно зависят от жесткости упругой системы станка, включая заготовку и инструмент [2]. Наблюдая ВА сигнал, можно оценивать качество оборудования, его приспособленность к ТТ. Это особенно важно при прерывистом резании, где за время обработки инструменту приходится многократно врезаться в закаленную поверхность, как, например, при фрезеровании. В этой связи и стойкостные испытания надо проводить с учетом частоты врезания в закаленную поверхность. Повышение скорости резания для получения дополнительного снижения твердости поверхности заготовки может быть оправдано только в том случае, если стойкость режущих пластин и твердость поверхности после обработки сохраняются на допустимом уровне.

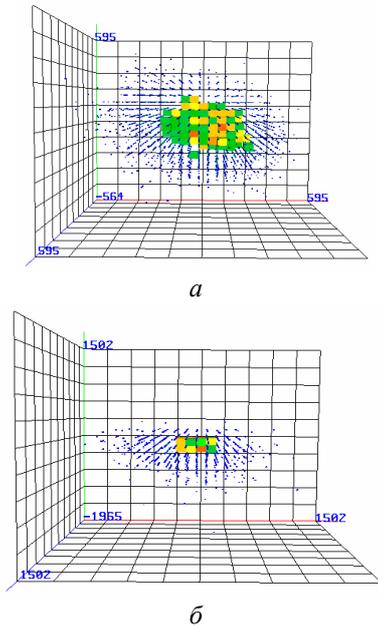
Износ и выкрашивание режущей пластины при ТТ – немаловажная проблема, поскольку меняющаяся геометрия режущей кромки влияет на температуру зоны пластической деформации, а последняя меняет твердость обрабатываемой поверхности. Количество выделяемого тепла при износе режущей кромки увеличивается, но его распределение по растущей площади контакта на передней и задней поверхностях инструмента может меняться неравномерно. В этом случае на контактных площадках могут возникать участки с повышенной по сравнению с острым инструментом твердостью. В первую очередь, это относится к задней поверхности инструмента, где скорость контакта выше, а глубина прогреваемого поверхностного слоя не велика по сравнению со стружкой. Затупление режущей кромки ведет к увеличению глубины внедрения вершины инструмента в обработанную поверхность и дополнительному расшире-

нию площади контакта. Рост объема деформируемого задней поверхностью материала и его отдаленность от зоны первичных пластических деформаций могут привести к тому, что с износом инструмента возрастает твердость на периферийных участках контактной площадки по задней поверхности.

На рис. 3 показаны пространственные диаграммы распределения времени присутствия колеблющейся вершины инструмента в различных точках (вид на плоскость  $XOY$ ) зоны резания. Темными квадратами выделены участки (ядро распределения), где время присутствия составляет не менее 60% от максимума распределения. Мелкими точками показаны прочие участки.

На рис. 3, а диаграмма дана для острого инструмента, а на рис. 3, б показана диаграмма для тех же условий, но для притупленного инструмента. Цифрами показаны в условных единицах диапазоны разброса положений вершины инструмента. Видно, что на обеих диаграммах разброс по оси  $X$  значительно превышает разброс по оси  $Y$ . С ростом износа разброс растет, в основном по оси  $X$ , а ядро распределения приближается к поверхности заготовки. Это говорит о том, что колебательные перемещения вглубь заготовки с ростом износа более затруднены. Возможно, это связано с уменьшением глубины пиропластичного слоя. Контакт становится большим по площади, но для прогрева на достаточную глубину по всей площади тепловых потоков не хватает. Это находит соответствующее отображение и в спектрах виброускорения по оси  $X$ , показанных на рис. 4, где показан спектр в диапазоне выше 1 кГц для резания притупленным резцом, а пунктиром показан контур спектра при резании острым рез-

цом. Видно, что амплитуды практически всех спектральных составляющих выросли.



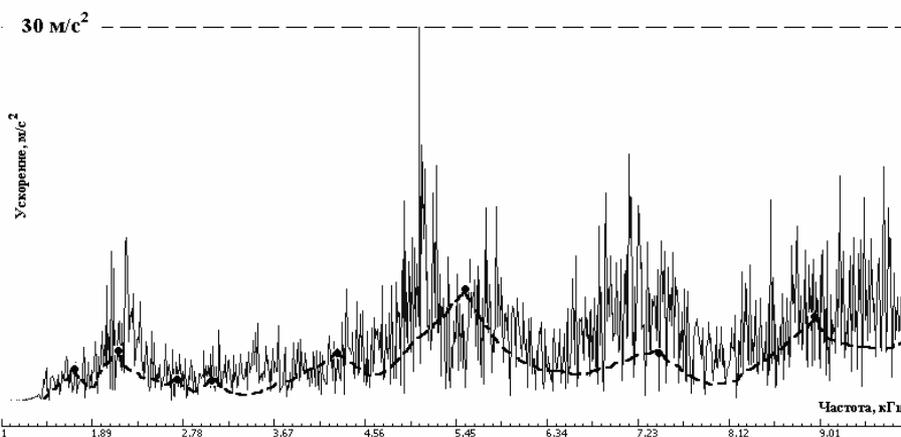
**Рис. 3.** Пространственные диаграммы распределения времени присутствия вершины реза в разных точках зоны резания: *a* – для острого инструмента, *б* – для тупого инструмента

Рост амплитуд на самых высоких частотах говорит в пользу гипотезы о повышении твердости обрабатываемой поверхности при увеличении износа. Можно добавить, что сигнал, сопровождающий точение изношенным резцом, характеризуется неравномерностью во времени, в нем присутствуют многочисленные всплески, которые не характерны для острого инструмента. Уровень этих всплесков не уступает амплитудам во время врезания в заготовку.

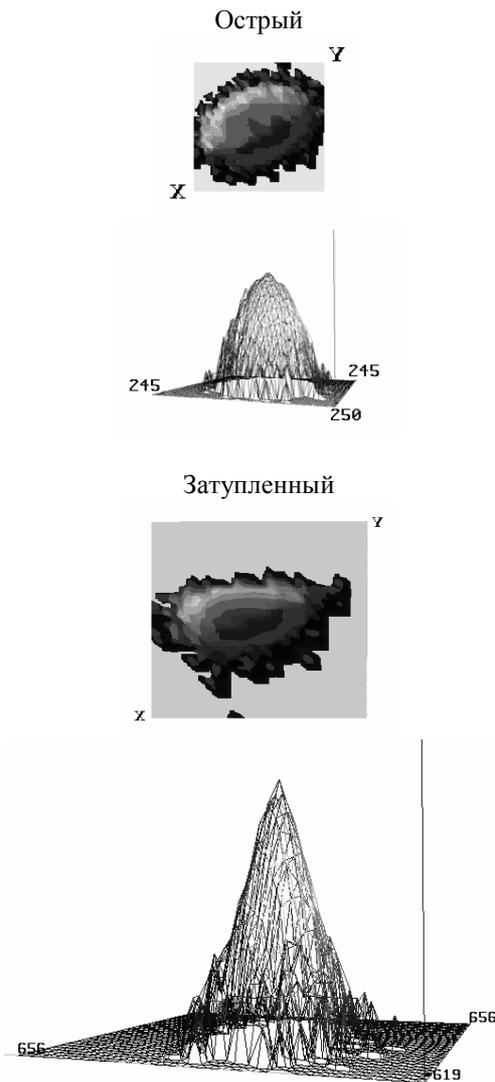
Качество поверхности при работе изношенным резцом может значительно ухудшаться, что становится заметно даже простым осязанием. На рис. 5 для примера показано, как эволюционировали законы распределения вероятности присутствия вершины режущего инструмента в пространстве координатной плоскости  $XOY$  (частотный диапазон – октавная полоса со средним геометрическим значением 4 кГц) при переходе от острой режущей кромки к затупленной при твердом точении стали с твердостью 55 HRC (сталь 40X – ВОР 60, скорость резания 400 м/мин, подача 0,06 мм/об, глубина 0,25 мм). Видно, что наибольшая эволюция идет по оси  $X$  (рост в 2,6 раза). По оси  $Y$  рост сравнительно небольшой, только на 35%. Таким образом, для установки акселерометра наибольший интерес представляют те позиции на упругой системе станка, где реакция в окрестностях 4 кГц на вибрации вершины инструмента в направлении  $X$  будет наибольшая.

Поскольку тепловые потоки определяют твердость поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, то, меняя эти потоки, можно в какой-то мере управлять изменением твердости. Управлять можно изменением скорости резания, изменением геометрии режущей кромки [3], а также изменением теплопроводности материала подложки, на которой базируется режущая пластина.

В процессе проведения исследований варьировался материал подложек. Помимо стандартных подложек испытывались подложки из гранита, из хлоритового сланца, из полимиктового песчаника и из композиции стали с синтетическим графитом.



**Рис. 4.** Спектр ВА сигнала при твердом точении затупленным резцом. Пунктиром показаны контуры спектра при точении в аналогичных условиях, но острым резцом



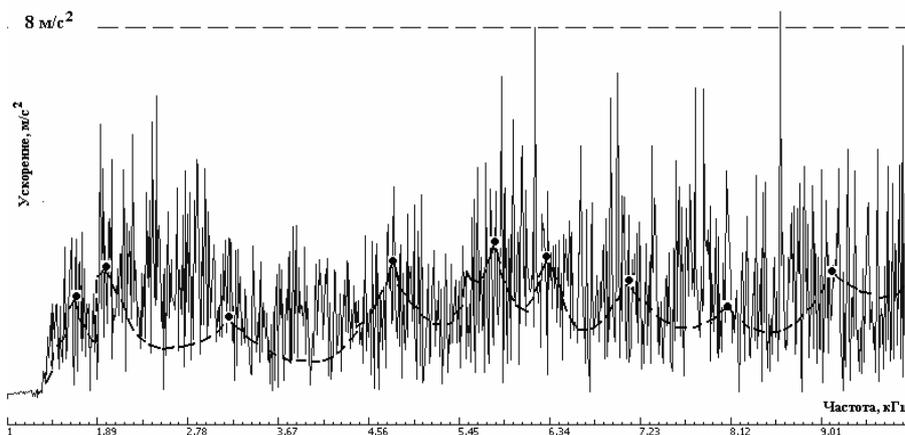
**Рис. 5.** Влияние износа РИ на эволюцию двумерных законов распределения вероятности присутствия вершины РИ в точках координатного пространства: твердое точение стали 55 HRC, октава 4 кГц

Эксперименты показали, что в одинаковых условиях обработки поверхностей с твердостью 55 HRC шероховатость поверхности при использовании стандартной подложки получалась  $Ra = 0,6$  мкм. Применение подложек с минеральной составляющей позволило уменьшить высоту микронеровностей в два раза, то есть получать поверхности с  $Ra = 0,3$  мкм.

На рис. 6 показан пример спектра в диапазоне 1–10 кГц по оси  $X$ , возникающий при устойчивом резании поверхности с твердостью 55 HRC при использовании стандартной подложки. На фоне графика пунктиром показаны контуры спектра, возникающего при аналогичных условиях, но при использовании подложки из хлоритового сланца. Видно, что спектральные составляющие, особенно в диапазоне от 5 до 10 кГц, значительно больше при работе стандартной подложкой. Это говорит в пользу гипотезы о влиянии теплопроводности подложки на изменение теплового потока и направления его в сторону поверхностного слоя, что и усиливает отпуск последней.

## ВЫВОДЫ

1. Контроль высокочастотных составляющих виброакустического сигнала позволяет вести мониторинг скорости отпуска поверхностного слоя при твердом точении. Это дает возможность обоснованно выбирать режимы резания и оценивать степень пригодности оборудования для реализации стабильного процесса твердого точения.



**Рис. 6.** Спектр ВА сигнала при твердом точении со стандартной подложкой. Пунктиром показаны контуры спектра при точении в аналогичных условиях, но с подложкой из хлоритового сланца

2. Износ режущего инструмента при твердом точении ведет к увеличению площади контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, для прогрева которой на достаточную глубину выделяющегося тепла может не хватать. Это ведет к росту твердости поверхностного слоя в зоне контакта и росту высокочастотной составляющей виброакустического сигнала.

3. Потоками тепла при твердом точении можно управлять не только подбором режимов резания и геометрии режущей кромки, но подбором теплопроводности материала подложки под режущей пластиной в инструменте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козочкин, М. П.** Виброакустическая диагностика технологических процессов / М. П. Козочкин. М.: ИКФ «Каталог», 2005. 196 с.

2. **Козочкин, М. П.** Оперативная диагностика при металлообработке – проблемы и задачи / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 3. С. 14–18.

3. **Лобанов, А. Н.** Обработка закаленной стали / А. Н. Лобанов // Журнал по металлообработке «Стружка». 2007. № 3. С. 31–33.

### ОБ АВТОРАХ



**Козочкин Михаил Павлович**, профессор. Дипл. инж.-механик (МГТУ «Станкин», 1969). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (ЭНИМС, 2002). Иссл. в обл. виброакустической диагностики технологического оборудования и процессов.



**Сабиров Фан Сагирович**, доц. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1973). Канд. техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (МГТУ «Станкин», 1979). Иссл. в обл. динамики несущих систем станков.



**Попиков Андрей Николаевич**, аспирант каф. технологии машиностроения РУДН. Дипл. магистр техники и технологии (РУДН, 2005). Готовит дис. в обл. диагностики процесса резания.