

Моделирование процесса ультразвукового резания с помощью ЭВМ

Разинкин А.В. (raaleksandr@yandex.ru)

Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН

Введение

Современные методы резания [1] позволяют обрабатывать материалы, традиционно плохо поддающиеся обработке и при этом получать заметно лучшее качество обработанной поверхности. Однако сильный разогрев резца при быстром резании высокопрочных сплавов, сильный износ оборудования и необходимость в охлаждении с помощью специальных охлаждающих эмульсий до сих пор являются проблемами, заметно затрудняющими данный процесс, приводя к удорожанию и усложнению процесса обработки.

Необходимы новые технологии, одной из которых является ультразвуковое резание [2,3]. Под ультразвуковым резанием понимается процесс, при котором резцу с помощью специального устройства сообщают высокочастотные (ультразвуковые) колебания, как правило, в направлении скорости резания [2-4]. Схема процесса ультразвукового резания показана на рис. 1.а, где 1 – обрабатываемое изделие, получающее вращение с угловой скоростью от привода станка; 2 – резец, которому сообщаются колебания $u(t)$ с частотой ω ; $V = \Omega r$ – скорость резания; r – радиус заготовки; P – постоянная составляющая силы резания.

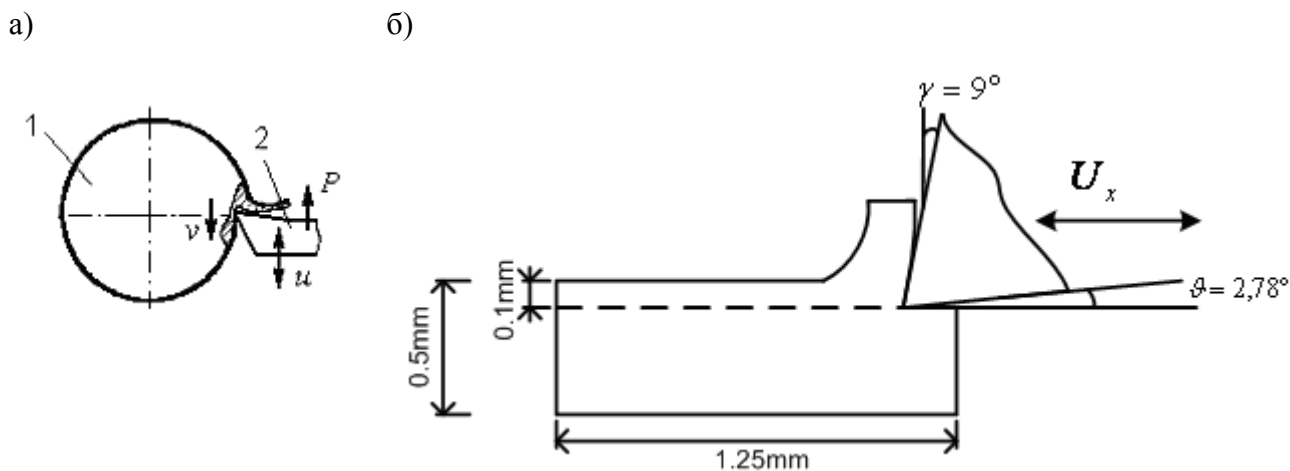


Рис. 1. а – схема резания на токарном станке, б – упрощенная схема резания, удобная для моделирования.

Многочисленными экспериментами установлено, что наложение ультразвуковой вибрации на равномерное движение резца, приводит к существенному снижению статической силы резания [2-4]. В [5,6] этот эффект получил объяснение на основе реологической модели процесса резания, учитывающей упругопластические свойства обрабатываемого материала и силы трения. Здесь же показано, что наиболее эффективными режимами при ультразвуковом точении являются периодические виброударные процессы в зоне резания. Динамические характеристики устройства для

ультразвукового резания как виброударной системы с распределенными параметрами построены в [7].

Отметим некоторые характерные особенности процесса ультразвукового резания, которые наблюдались в экспериментах при обработке различных материалов [7,8].

Упомянутое выше снижение сил резания наблюдается при скоростях резания $V < a\omega$ (a, ω – амплитуда и круговая частота колебаний резца) и происходит при точении всех металлов: алюминия, меди, бронзы, латуни, углеродистых, нержавеющей и жаропрочных сталей, титана и др.

Ультразвуковое резание радикально изменяет структуру и микрогеометрию обработанной поверхности.

При ультразвуковом резании существенно меняется характер процесса. Так, наложение ультразвуковых колебаний полностью исключает характерное для традиционного точения образование на поверхностях резца наростов при точении алюминия и меди. Ультразвуковая вибрация существенно изменяет характер снимаемой стружки. Даже при обработке материалов, обычное точение которых сопровождается образованием ломкой стружки, при ультразвуковом резании образуется сливная пластичная стружка без заусенцев и неровностей. Как результат, наложение ультразвука позволяет существенно уменьшить величину минимально возможного срезаемого слоя. При этом существенно меняется тепловой режим в зоне резания.

При ультразвуковом резании устраняется склонность системы «Станок – Инструмент – Деталь» к возбуждению автоколебаний, ухудшающих качество обрабатываемой поверхности. Включение ультразвука полностью устраняет автоколебания и позволяет получать однородную поверхность на всей длине, например, технологически нежестких изделий без применения промежуточных опор и люнетов.

Некоторые из указанных явлений удается объяснить с помощью относительно простых моделей [6,7]. Однако задачи, связанные, например, с учетом влияния температуры в зоне резания или влияния ультразвуковых колебаний на условия возбуждения автоколебаний оказываются настолько сложными, что не могут быть решены аналитическими методами и требуют применения иных подходов.

В данной работе приводятся результаты моделирования процесса ультразвукового резания металлов с помощью метода конечных элементов. В построенной конечно элементной модели учитываются как упругопластические свойства обрабатываемого материала, так и термодинамические характеристики изделия, инструмента и окружающей среды, позволяющие описать происходящие в зоне резания термомеханические процессы. Полученные результаты сравниваются с результатами аналитических решений и экспериментальными данными.

Постановка задачи

В рамках задачи была создана геометрическая модель ультразвукового резания, заданы свойства материала образца (резец в рамках задачи считается абсолютно недеформируемым телом), выбран рассматриваемый временной промежуток и задано движение резца. Для задачи без использования ультразвука и для задачи с использованием ультразвука все начальные условия были заданы одинаково, отличие состояло только в наличии ультразвуковых колебаний для задачи с ультразвуком.

Параметры образца: ширина 1.25 мм, высота 0.5 мм, толщина срезаемого слоя 0.1 мм (см. рис. 2).

Резец в задаче считается абсолютно недеформируемым телом. Угол наклона γ его верхней грани к оси y равен 9° , а угол наклона его нижней грани к оси x равен $2,7^\circ$.

Хотя на настоящем станке движется образец, в рамках данной задачи будем считать, что движется резец по заданному закону перемещения.

Поскольку по условию задачи в вертикальном направлении резец не совершает движений, зададим закон движения резца в продольном направлении для ультразвука и без него:

$$U_x = -Vt - a \sin \omega t \tag{1}$$

Формула (1) задает закон движения резца для задачи с ультразвуком, при $a = 0$ получаем задачу без ультразвука. Зададим $V = 300 \text{ мм/с}$, $a = 13 \text{ мкм} = 0.013 \text{ мм}$, $\omega = 40\pi$, что соответствует частоте в 20кГц, за единицу времени возьмем миллисекунду.

Как уже говорилось выше, резец в условиях данной задачи является недеформируемым телом, тогда как образец состоит из стали. Ее модуль Юнга $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 0.3 \text{ ГПа}$. График зависимости напряжения от деформации для данного материала изображен на рисунке 2 (материал считается идеально упругопластическим).

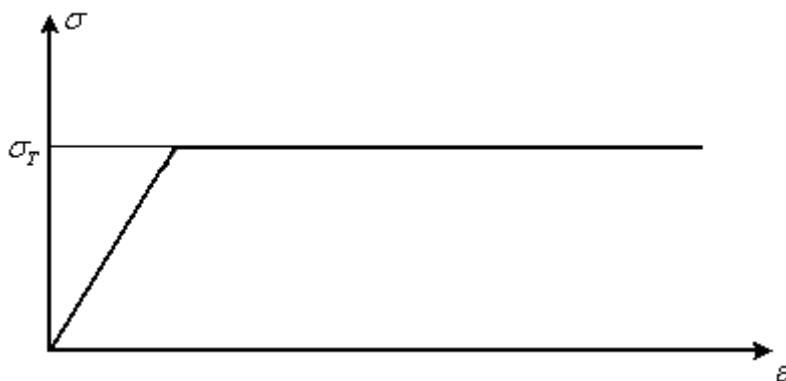


Рис. 2. График напряжение/деформация для выбранного материала.

Результаты расчета

Задача была посчитана в программе MSC.MARC 2005 [10]. В программе были заданы сама модель, свойства материала образца, заделка нижнего конца, закон движения резца и параметры сетки разбиения.

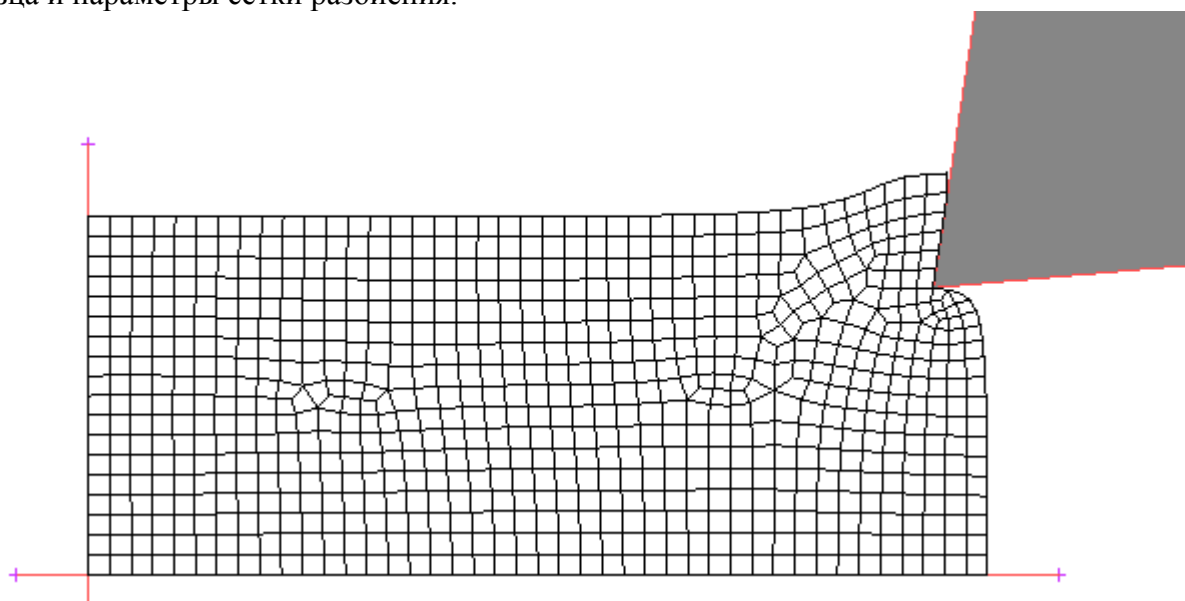


Рис. 3. Сетка конечных элементов бруска в задаче на ультразвуковое резание.

Поскольку процесс резания сопровождается большими по величине деформациями, в программе была также использована такая опция, как автоматическое переразбиение сетки в зависимости от изменившихся условий или, как это иногда принято

называть, адаптивная сетка разбиения. Вообще говоря, без данной опции подобного рода задачи не получаются, поэтому автоматическое переразбиение является необходимостью.

На выходе задачи в программе можно получить такие величины, как любой из компонентов тензора напряжений или Эквивалентное напряжение Мизеса (Equivalent von Mises Stress), а также результирующую силу контактного взаимодействия между резцом и образцом, то есть силу резания (рис. 4), а также силу трения, температуру и некоторые другие величины.

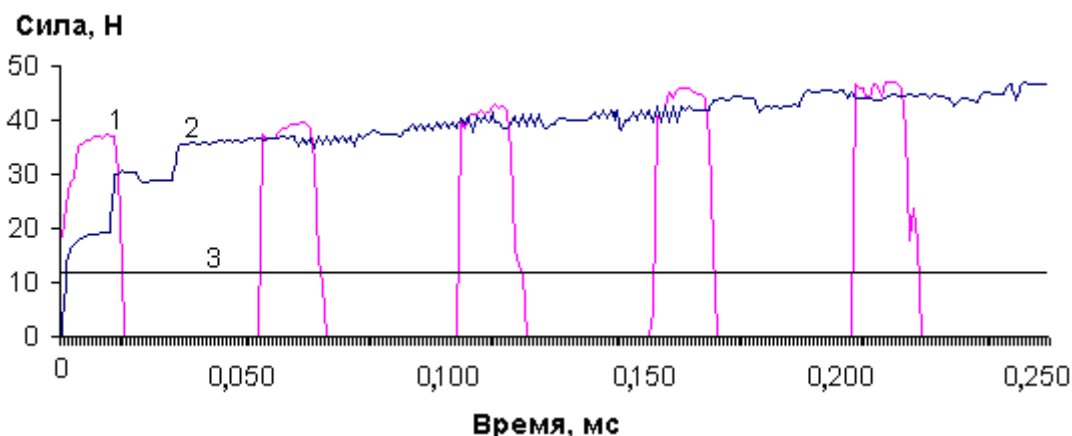


Рис. 4. График силы резания в течении задачи.
 Кривая 1 – сила резания для задачи с ультразвуком;
 Кривая 2 – сила резания для задачи без ультразвука;
 Прямая 3 – средняя сила резания для задачи с ультразвуком.

Сравним силу резания для задачи с ультразвуком и для задачи без ультразвука (рис. 4). До 0,1 мс происходит установления процесса, поэтому будем рассматривать последние 3 колебания, когда процесс является более-менее устоявшимся.

На рисунке можно увидеть характерные пики возрастания силы, соответствующие колебаниям для задачи с использованием ультразвука (кривая 1 на рис. 4) и более-менее постоянную величину силы резания без использования ультразвука (кривая 2 на рис. 4). Следует также обратить внимание на прямую 3, соответствующую средней силе резания для процесса с использованием ультразвука – она намного меньше, чем сила резания для процесса без использования ультразвука.

Таким образом, был смоделирован наблюдаемый в экспериментах эффект снижения силы резания при использовании ультразвука.

Влияние силы трения на результаты расчета

Теперь рассмотрим влияние трения на результат задачи. В данной модели сухое трение происходит в месте образования стружки о резец, прижатый к стружке силой резания, причем трется именно поверхность только что образовавшейся стружки. На рисунке 6 стрелка вектор F_p показывает направление силы резания, а вектор F_{TP} указывает силу сухого трения, которая действует на поверхность стружки.

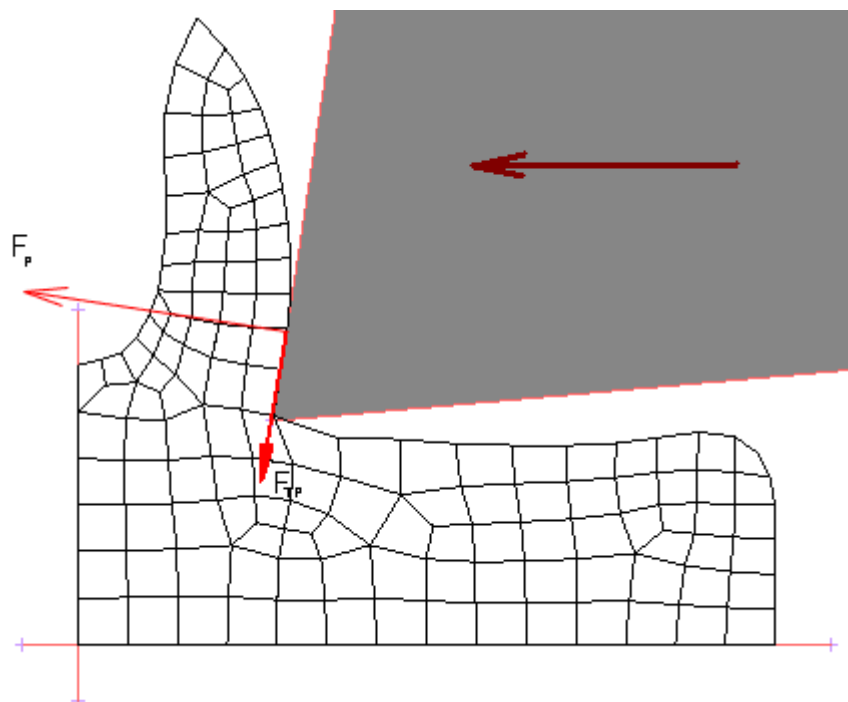


Рис. 5. Направление силы трения, приложенного к стружке при резании образца.

Исключительно благодаря трению можно наблюдать очень интересный эффект – уменьшение радиуса закручивания стружки для задачи с трением по сравнению с задачей без трения. Данный эффект, очевидно, объясняется действием силы трения на стружку, направленной таким образом, чтобы препятствовать закручиванию стружки (рис. 6).

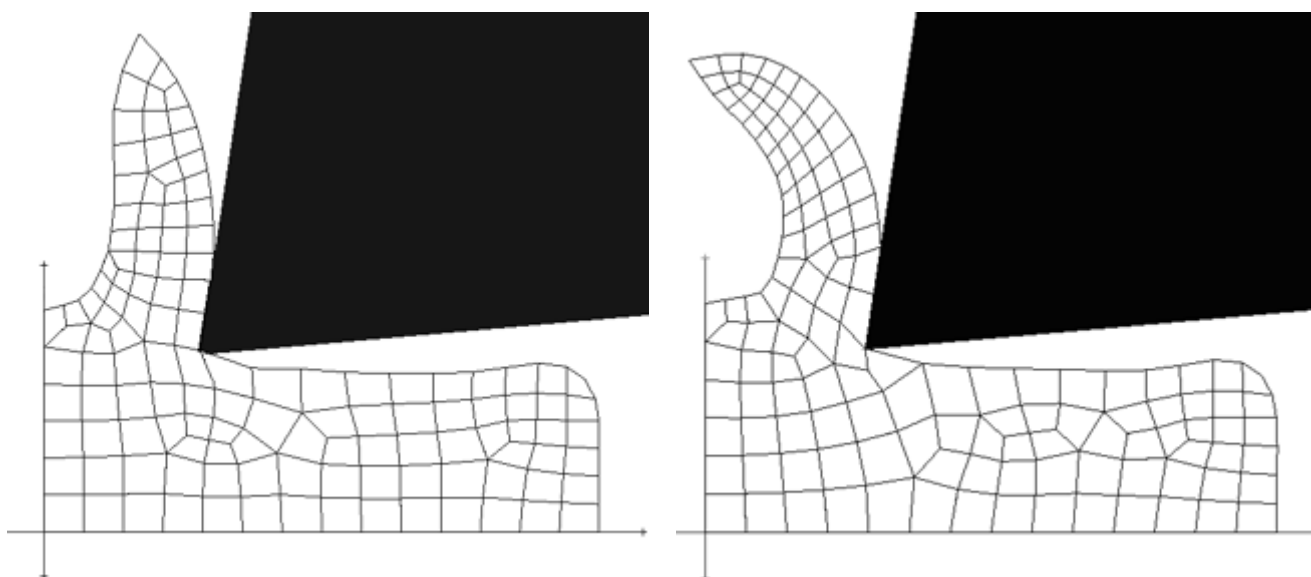


Рис. 6. Эффект уменьшения радиуса закручивания стружки для задачи с трением (а) по сравнению с задачей без трения (б).

На левом рисунке изображен результат моделирования с коэффициентом трения $\nu = 0.3$, а на правом рисунке результат решения задачи без учета трения.

Что касается изменения силы резания в результате действия силы трения, то сила резания, естественно, увеличивается при наличии трения, но не более чем на 10-15%. То есть сила трения вносит заметный, но не столь существенный вклад в величину силы резания, будь то резание с использованием ультразвука или без него.

Моделирование процесса теплообразования при резании стали

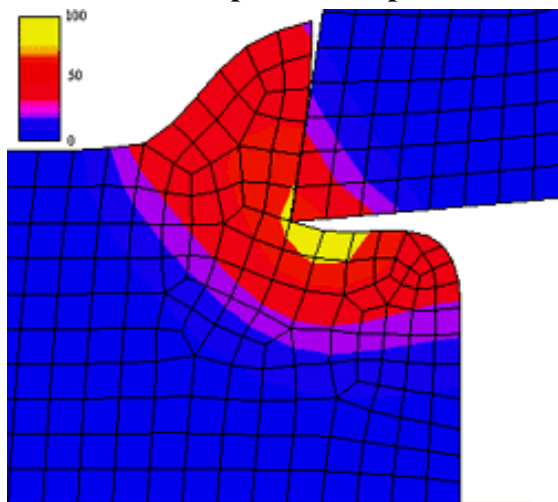


Рис. 7.а. Температура образца и режущего инструмента при ультразвуковом процессе резания стали с параметрами $E=200\text{ГПа}$, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 0.3\text{ГПа}$, $U_x = -Vt - a \sin \omega t$, $V = 300\text{мм/с}$, $a = 0.013\text{мм}$, $\omega = 40\pi$, $t=0.8\text{мс}$.

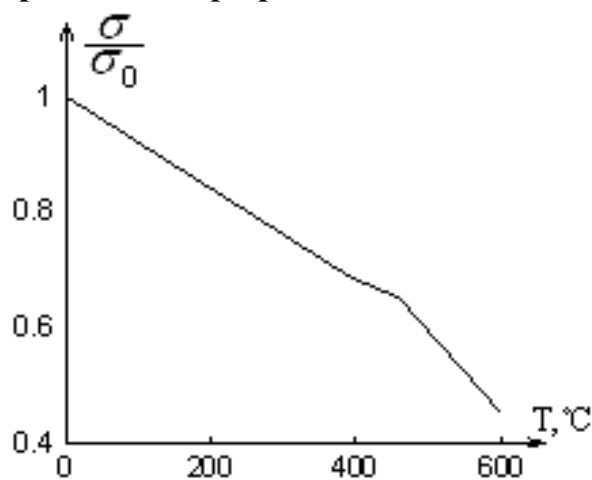


Рис. 7.б. График зависимости предела текучести стали от температуры.

На рис. 7.а изображена карта температур в зоне резания для задачи резания стали через 0.8 миллисекунды после начала резания. На рисунке видно, что самая высокая температура достигается в зоне стружкообразования. В зоне непосредственного контакта реза и детали она достигает 100°N . Стружка тоже подвергается достаточно сильному нагреву. При удалении от зоны резания температура довольно быстро убывает, а на расстоянии 0.15 мм от зоны резания уже не превышает 25 градусов.

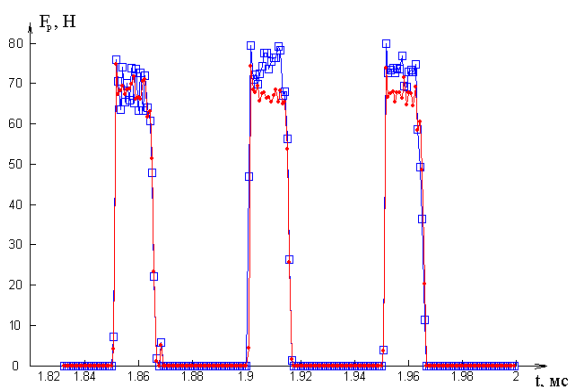


Рис. 8.а. Сравнение силы резания для задачи с резанием и без трения (с ультразвуком и с учетом теплоты).
 -□- с трением;
 -●- без трения.

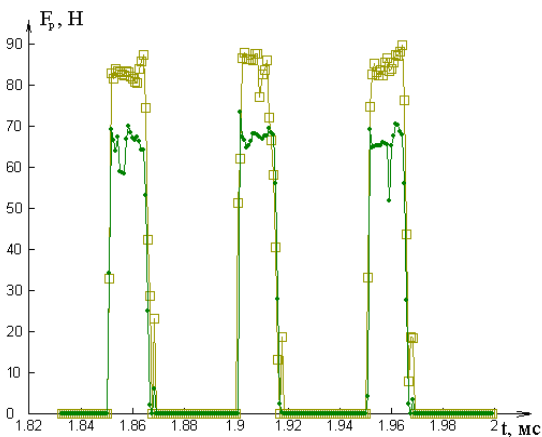


Рис. 8.б. Сравнение силы резания для задачи с трением и без трения (с ультразвуком без учета теплоты).
 -□- с трением;
 -●- без трения.

Сравним теперь величину силы резания для нескольких различных задач и условий. Под силой резания в данном случае понимаем усилие, которое нужно приложить к режущему инструменту для выполнения заданного процесса резания.

В первую очередь следует обратить внимание, что во всех случаях при наличии трения сила резания повышается (рис. 8.а-8.б).

На рис. 8.а и 9.б изображены графики силы резания для задач с использованием ультразвука, причем на рис. 8.а учитывается теплота, а на рис. 8.б не учитывается. Если сравнить эти два графика, можно заметить небольшую разницу: для случая без учета теплоты сила резания несколько больше, что можно объяснить некоторым размягчением материала при повышении его температуры (данный эффект в модели учитывается, рис. 7.б).

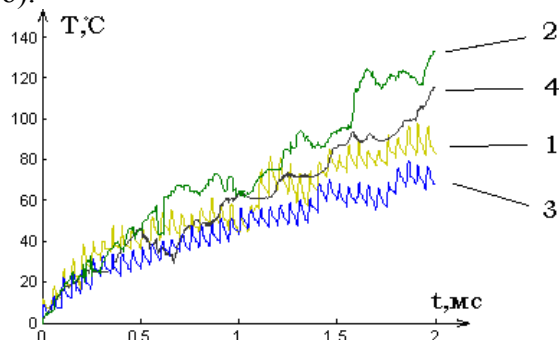


Рис. 9.а. Сравнение температуры области детали, непосредственно соприкасающейся с резцом для различных задач.
 1 - задача с трением и ультразвуком;
 2- задача с трением и без ультразвука;
 3 - задача без трения и с ультразвуком;
 4 - задача без трения и без ультразвука.

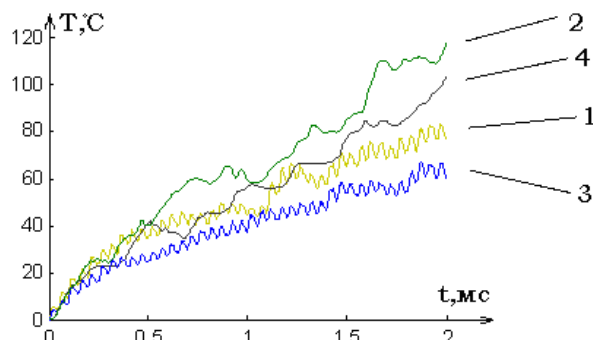


Рис. 9.б. Сравнение температуры кончика режущего инструмента для различных задач.
 1 - задача с трением и ультразвуком;
 2- задача с трением и без ультразвука;
 3 - задача без трения и с ультразвуком;
 4 - задача без трения и без ультразвука.

Рассмотрим теперь графики температуры в зоне резания в детали и в режущем инструменте. Начальная температура в задаче задана как 0 градусов.

На рис. 9.а можно увидеть графики изменения температуры в детали непосредственно в зоне резания. На графике можно видеть характерные пики возрастания температуры для графиков с использованием ультразвука. Данные импульсы являются результатом нагрева материала при внедрении резца и последующим охлаждением в период между ультразвуковыми импульсами. Мы можем видеть, что температура почти всегда выше для задачи с трением, а также температура выше для задачи без ультразвука.

Что касается температуры режущего инструмента (рис. 9.б), то картина получается похожая – температура резца заметно меньше при использовании ультразвука. Очевидно, указанный факт позитивно сказывается на износоустойчивости резца – при использовании ультразвука резец дольше изнашивается.

Данный факт (уменьшение температуры в зоне резания при использовании ультразвука) также подтверждается экспериментами. В экспериментах было замечено, что стружка выходит более холодной в случае использования ультразвука, чем без него. Это легко заметить, например, опустив стружку в воду – стружка после обычного резания обычно нагрета более 100 градусов и «шипит», тогда как стружка после ультразвукового резания явно не достигает 100-градусной температуры.

Еще одна задача, которая была решена с помощью указанной модели – задача с ненулевой начальной температурой. Дело в том, что в указанной выше модели были рассчитаны только первые 2 миллисекунды, в течение которых температура в зоне резания постоянно повышалась. Чтобы выполнить моделирование на более долгом промежутке, пришлось бы увеличить точность задачи, чтобы добиться сходимости после 5-6 миллисекунд, а также выделить очень большое дисковое пространство для хранения результатов.

Поэтому был использован следующий прием – начальная температура модели была выбрана ненулевой. Целью было найти ту начальную температуру, при которой термодинамическая система сразу должна была бы войти в равновесие, чтобы температура в зоне резания не менялась.

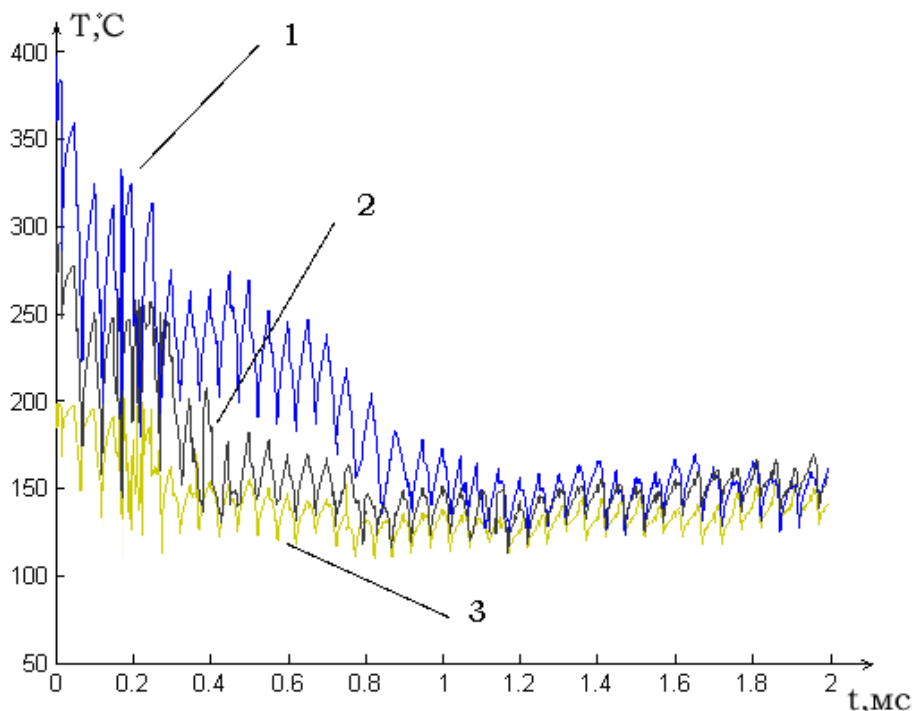


Рис. 10. Модель с ненулевой начальной температурой.

- 1 – начальная температура 400 градусов.
- 2 – начальная температура 300 градусов.
- 3 – начальная температура 200 градусов.

На рисунке 10 видно, что при разной начальной температуре в течение некоторого времени температура сближается и через 2 миллисекунды разница составляет уже не более 30 градусов, средняя температура получается около 150 градусов для рассматриваемой задачи. Очевидно, что тепловой баланс для рассматриваемой модели достигается не при 400 и не при 300 градусах, а скорее при 150-200.

Различные начальные условия

Приведем результаты моделирования процесса для различных скоростей резания и для различных материалов. Начальная температура T_0 считается равной 0°C .

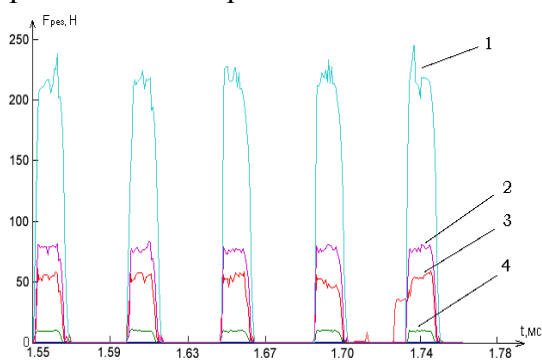


Рис. 11.а. Сила резания при резании различных материалов:

- 1 – инконель;
- 2 – сталь;
- 3 – медь;
- 4 – алюминий.

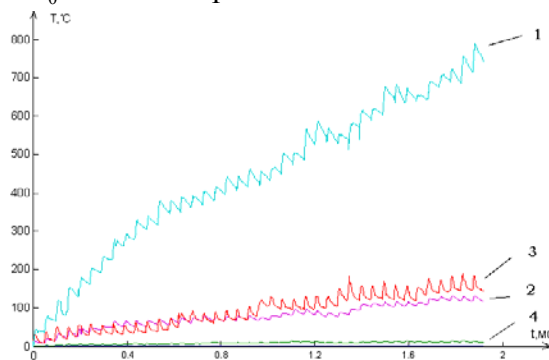


Рис. 11.б. Температура детали в зоне резания для различных материалов. Начальная температура $T_0 = 0^\circ\text{C}$:

- 1 – инконель;
- 2 – сталь;
- 3 – медь;
- 4 – алюминий.

На рисунке 11.а-11.б приведены результаты моделирования ультразвукового резания для различных материалов, где можно увидеть, что сила резания для различных материалов довольно сильно отличается. Самая большая сила резания у инконеля (рис. 11.а), наиболее твердого материала, а легче всего режется алюминий. Действительно, сила резания линейно зависит от предела текучести материала и полученные результаты это очень хорошо иллюстрируют.

Для температуры картина похожа на силу резания (рис. 11.б), но есть и некоторые отличия. Как и на графике силы резания, на графике температур самые большие значения достигаются при резании инконеля, а самым нижним оказался график температуры резания алюминия. Однако графики температуры резания меди и стали сблизилась и поменялись местами. Данный факт объясняется намного меньшим коэффициентом теплоемкости меди, что не компенсируется ее более значительным коэффициентом теплопроводности, то есть медь позволяет быстрее отводить тепло, но требует значительно меньше энергии для нагрева, что в сумме дает более высокую температуру резания, чем для стали.

Также интерес представляет моделирование процесса ультразвукового резания при различных скоростях резания. В данном случае изменяется скорость поступательного движения резца V , а амплитуда и частота колебаний остается без изменений.

Интерес представляет соотношение $v/a\omega$, где v - скорость поступательного движения резца, a - амплитуда ультразвуковых колебаний, ω - частота ультразвуковых колебаний. При этом $a\omega$ соответствует максимальной скорости колебательного движения, поэтому если линейная скорость $v \geq a\omega$, то резание перестает быть вибрационным и превращается в обычное резание.

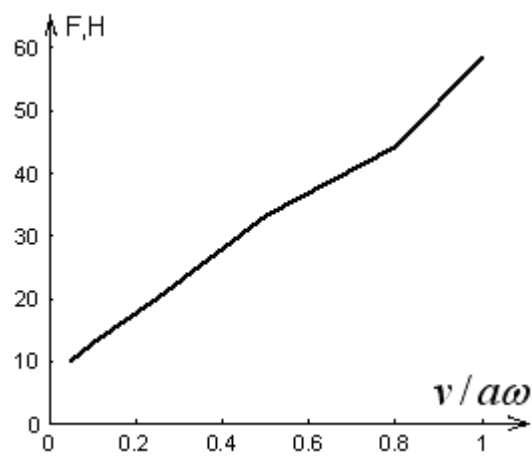
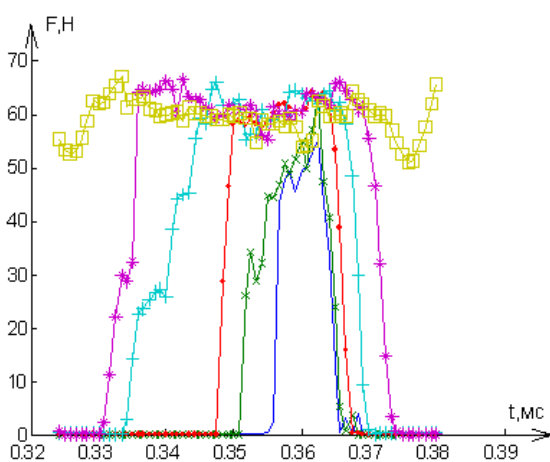


Рис. 12.а. Диаграмма импульса силы резания при различных скоростях резания:

Рис. 12.б. Зависимость средней силы резания от соотношения $v/a\omega$.

- $v/a\omega = 0,05$
- *— $v/a\omega = 0,1$
- $v/a\omega = 0,25$
- +— $v/a\omega = 0,5$
- *— $v/a\omega = 0,8$
- $v/a\omega = 1$

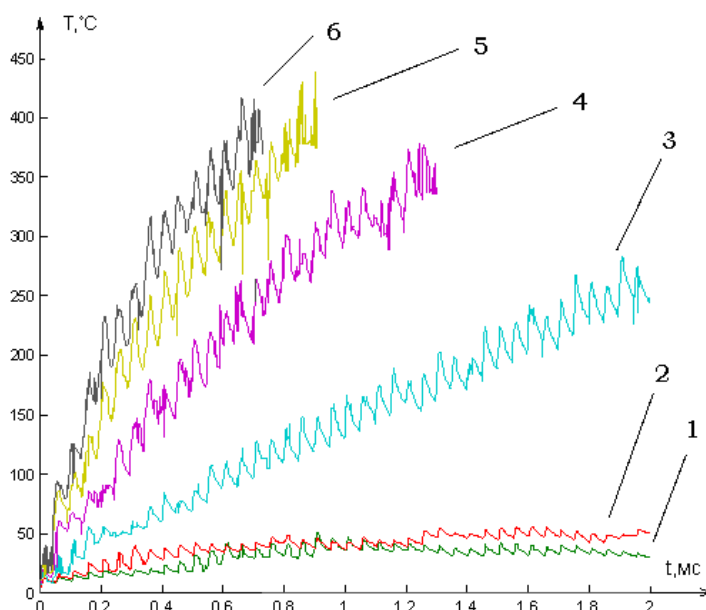


Рис. 12.в. Температура детали в зоне резания при различных скоростях резания.

- 1 – $v/a\omega = 0,05$
- 2 – $v/a\omega = 0,1$
- 3 – $v/a\omega = 0,25$
- 4 – $v/a\omega = 0,5$
- 5 – $v/a\omega = 0,8$
- 6 – $v/a\omega = 1$

На рисунке 12.а можно увидеть силу резания для задач с различной скоростью резания. Можно заметить, что диаграммы для различных скоростей как бы вкладываются друг в друга, однако имеют примерно одинаковые максимумы. На рисунке 12.б собрана обобщенная информация в виде графика зависимости силы резания от соотношения $v/a\omega$. При соотношении $v/a\omega = 1$ ультразвуковое резание превращается фактически в обычное резание, а сила резания при этом больше, чем для любого из режимов ультразвукового резания. Это, очевидно, еще одна иллюстрация эффекта уменьшения силы резания при использовании ультразвука.

На рисунке 12.в представлены диаграммы температуры детали в зоне резания. На рисунке можно видеть, что температура намного выше при больших скоростях резания. Это естественно, потому что за единицу времени выделяется больше тепла, а отвод тепла происходит с одинаковой скоростью для всех случаев.

Выводы

В данной работе, во-первых, был смоделирован процесс резания бруска металла с помощью резца. Геометрия задачи совпала с реальным процессом резания, в результате компьютерного моделирования получалась та же стружка, что и при реальном резании.

Второе, что получилось в задаче – это сила резания, величина, достоверность которой можно проверить по многочисленным экспериментам. Для процесса непрерывного резания сила резания является более-менее постоянной, для процесса ультразвукового резания сила резания выглядит на графике как последовательность импульсов. Если посчитать среднюю силу резания при ультразвуке, то она получается меньше силы резания при непрерывном процессе, причем эта разница зависит от скорости резания (рис. 4).

Третье – это моделирование процесса с учетом силы трения. Трение происходит в результате того, что соприкасающаяся с резцом образовавшаяся стружка движется вверх,

в результате чего происходит трение стружки о резец. Сила трения не изменила значительно силу резания, которая увеличилась лишь на 10-15%, однако она существенно повлияла на геометрию задачи. Речь идет радиусе закручивания стружки, который намного меньше для задачи с учетом трения (рис. 6). Данный факт также наблюдался в экспериментах и описывался в различных работах и подтверждает правильность задачи и правильность расчета силы трения в модели.

Четвертое – это тепловые эффекты, которые также были учтены в условии задачи и дали довольно подробную карту температур в зоне резания и другую информацию. Также тепловые эффекты позволили окончательно оценить вклад каждого отдельного условия в общий процесс.

Интересно, что выделение теплоты – это такой эффект, который оказывает влияние сам на себя. А именно, при выделении теплоты уменьшается предел текучести, следовательно, уменьшается тепловыделение.

Литература

1. Грановский Г., Грановский В. Резание металлов. М.: Высш. шк., 1985 – 304 с.
2. Исаев А.И., Анохин В.С. Применение ультразвуковых колебаний инструмента при резании металлов – Вестник машиностроения, 1961, № 5, с.56– 62.
3. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1968, 367 с.
4. Кумабэ Д. Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
5. Асташев В.К. О влиянии ультразвука на процессы пластического деформирования // Машиноведение. 1983. № 2. С. 3 – 12.
6. Асташев В.К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 1992, №3, с.81-89.
7. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process – Ultrasonics, 1998, №6, p. 89 – 96.
8. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic processes and machines. Dynamics, control and applications. Berlin. Springer. 2007.
9. N. Ahmed, A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt. Finite element modelling of ultrasonically assisted turning.
10. MSC.Marc User Guide Version 2005, MSC Software Corporation, Los Angeles.
11. О. Зенкевич. Метод конечных элементов в технике. Перевод с английского. Издательство «Мир», Москва. 1976. 541с.
12. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде MSC Visual Nastran for Windows. Москва 2004. 546 стр.