

УДК 534.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РЕЗАНИЕ

В.К. Асташев, А.В. Разинкин

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 и модельных решений и экспериментальными данными.

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 Ω от привода станка; 2 – резец, которому сообщаются колебания $u(t) = a \sin \omega t$ с угловой частотой ω и амплитудой a ; $V = \Omega r$ – скорость резания; r – радиус заготовки; P – постоянная составляющая силы резания.

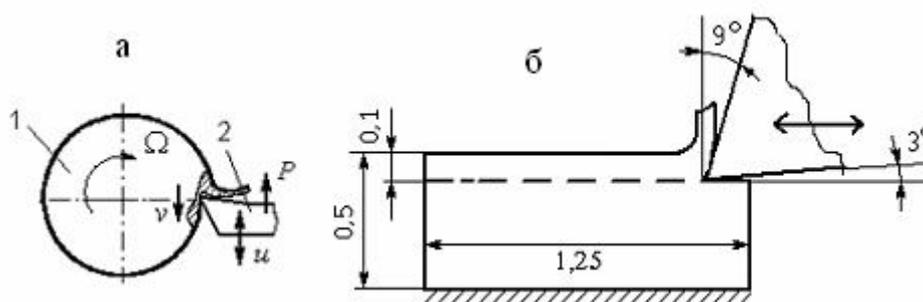


Рис. 1

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 и модельных решений и экспериментальными данными [6-9].

1. При построении конечно элементной модели резец считается абсолютно жестким телом. Его геометрические параметры (передний угол $\gamma = 9^\circ$, задний угол $\alpha = 3^\circ$), а также параметры образца (ширина 1,25 мм, высота 0,5 мм, толщина срезаемого слоя 0,1 мм) показаны на рис. 1.б.

Предполагается, что обрабатываемый образец неподвижен, а резец совершает движение по заданному закону

$$U = Vt + u(t) = Vt + a \sin \omega t. \quad (1)$$

При $a = 0$ выражение (1) описывает традиционное резание без ультразвука со скоростью V .

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.

Во всех приведенных ниже примерах расчета приняты следующие параметры движения резца: $V = 300 \text{ мм/с}$, $a = 13 \text{ мкм} = 0,013 \text{ мм}$, $\omega = 4\pi \cdot 10^4 \text{ рад/с}$, что соответствует частоте 20 кГц. Предполагается, что образец выполнен из стали (модуль Юнга $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 0,3 \text{ ГПа}$), причем его деформация описывается характеристикой упругопластического материала (рис.2,а). В рассматриваемой модели учитываются силы трения, возникающие в зоне резания. Величина силы трения в точках контакта пропорциональна нормальному давлению на грани резца, а направление противоположно относительной скорости резца и элементов обрабатываемого изделия.

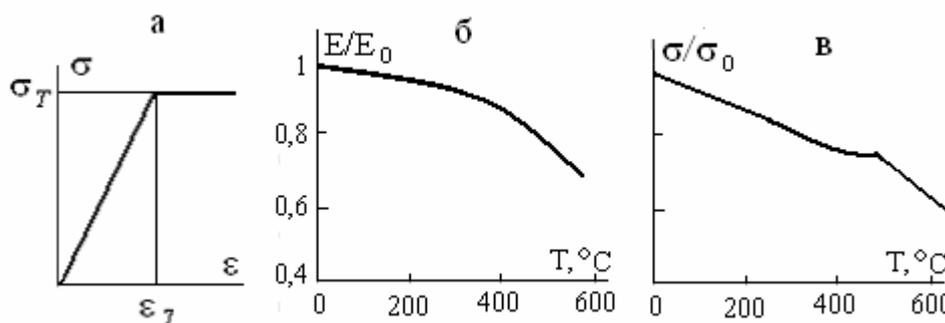


Рис. 2.

Кроме того, при учете тепловых процессов считается, что вследствие разогрева материала при резании образца его упругопластические свойства изменяются в зависимости от текущей температуры. На рис.2,б,в показаны зависимости предела текучести σ_T и модуля упругости E от температуры. При решении задачи влияние перечисленных факторов на процесс резания учитывалось как по отдельности, так и в совокупности.

При решении задачи без учета термодинамических процессов рассматривается временной промежуток длиной в 0,25 мс. В течение этого времени инструмент совершает 5 циклов колебаний, причем процесс можно считать установившимся уже после трех первых циклов. За этот промежуток выполнялось 250 расчетов (итераций) методом конечных элементов.

Первоначальный размер ребра сетки разбиения составлял не более 30 мкм. Поскольку процесс резания сопровождается большими по величине деформациями, в программе была использована такая опция как автоматическое перестроение сетки в зависимости от изменившихся условий или через определенное количество итераций. Вообще говоря, без данной опции подобного рода задачи не решаются, поэтому автоматическое перестроение сетки является необходимостью. В данной задаче автоматическое перестроение производится каждые 5 итераций. Таким образом, в течение 250 итераций сетка перестраивалась 50 раз. Следует также отметить, что точность разбиения была задана так, чтобы размер ни одного из ребер четырехугольного элемента сетки не превышал 30 мкм. На рис. 3,а показан фрагмент сетки конечных элементов в начале резания, на котором отчетливо виден результат перестроения сетки в окрестности зоны резания.

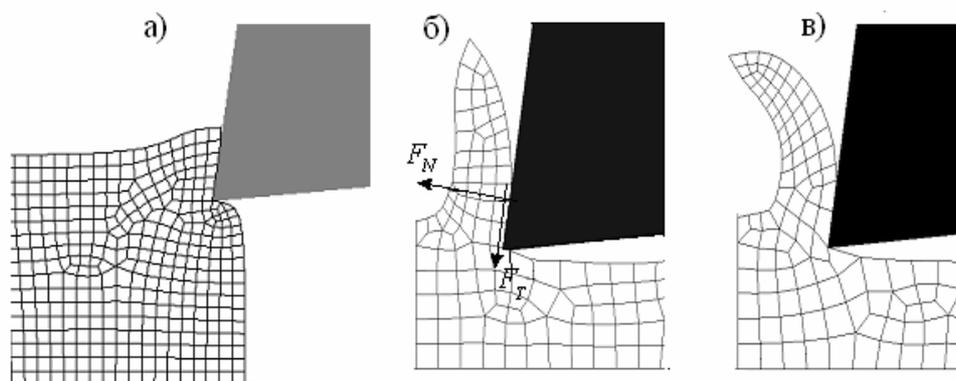


Рис.3

В результате решения можно получить такие величины, как любой из компонентов тензора напряжений, эквивалентное напряжение Мизеса, результирующую силу контактного взаимодействия между резцом и образцом, распределение температурного поля в обрабатываемом образце и резце и ряд других величин.

2. Приведем некоторые результаты решения задачи без учета тепловых процессов. На рис. 4 показаны полученные в результате решения зависимости силы резания в направлении движения резца при традиционном (кривые 2, 4) и ультразвуковом точении (кривые 1, 3), причем кривые 3 и 4 построены с учетом, а кривые 1 и 2 без учета силы трения. Заметим, что на начальной стадии резания наблюдается переходный процесс, обусловленный врезанием резца в тело изделия. Процесс можно считать установившимся при $t > 0,15$ мс. Из рисунка видно, что процесс ультразвукового резания представляет собой периодическую последовательность силовых импульсов, продолжительность которых зависит от соотношения постоянной скорости V и амплитудного значения вибрационной скорости $a\omega$. Следует обратить внимание на горизонтальную линию 5, соответствующую средней силе резания для процесса ультразвукового резания. Именно такую силу, которая значительно меньше силы традиционного резания, должен развивать привод для реализации процесса с наложением ультразвуковых колебаний. Этот эффект снижения силы резания при наложении высокочастотной вибрации наблюдается в экспериментах [2-4] и объясняется в работах [6-8].

Теперь рассмотрим более подробно влияние трения на процессы резания. В данной модели происходит сухое трение в месте образования стружки. На рис.3,б,в изображен результат решения задачи с коэффициентом трения $\mu = 0,3$, а на рис.3,в – результат решения без учета трения. На рис.3,б сила F_N – нормальная сила взаимодействия резца со стружкой, F_T – сила трения поверхности стружки о резец. Исключительно благодаря трению можно наблюдать очень интересный эффект – уменьшение радиуса закручивания стружки для задачи с трением по сравнению с задачей без трения. Как видно из рисунков, данный эффект объясняется тем, что сила трения препятствует закручиванию стружки.

Здесь следует отметить различие в действии сил, возникающих в зоне резания, в процессах традиционной и ультразвуковой обработки. При традиционном резании в начале врезания происходит упругое деформирование материала в зоне резания, а затем после достижения предела текучести начинается пластическое течение материала, т.е. собственно непрерывный процесс резания, в течение которого нормальные силы и силы трения остаются постоянными. Возвращаясь к рис. 4, заметим, что в рассматриваемом

случае сила резания, обусловленная только пластическим деформированием (кривая 2), составляет 45–50 Н, а учет трения (кривая 4) дает добавку к силе резания 6–8 Н. Как отмечалось выше, при ультразвуковом резании силы в зоне контакта представляют собой периодическую последовательность силовых импульсов, в промежутках между которыми происходят разрывы контакта резца с деталью. Поэтому в каждом цикле происходит смена процессов упругого нагружения, пластического деформирования и упругой разгрузки, что хорошо видно из кривых 1,2 рис.4.

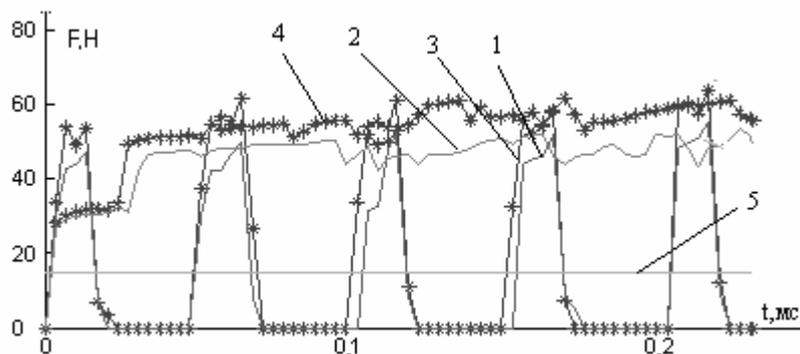


Рис.4

Обратим внимание на то, что за короткое время пластического деформирования резец обрабатывает такой же участок поверхности как при традиционном резании за время, соответствующее одному периоду следования импульсов. При этом силы пластического деформирования и трения в обоих случаях практически одинаковы. Таким образом, сила трения вносит заметный, но не столь существенный вклад в величину силы резания, будь то резание с использованием ультразвука или без него.

3. Резание металла – это процесс, сопровождающийся интенсивным выделением тепла. Основной областью образования теплоты является зона стружкообразования непосредственно перед режущим инструментом, в которой металл срезаемого слоя подвергается пластической деформации и разрушению. Вторым источником теплоты в этой же зоне является трение. Вся механическая работа, затраченная на пластическую деформацию и разрушение металла в процессе стружкообразования, а также на преодоление сил трения превращается в теплоту, вызывая повышение температуры в зоне резания. Одновременно из-за перепада температур происходит отток тепла в более холодные области заготовки, резца и окружающего пространства. При традиционном резании оба процесса происходят непрерывно, температура в области резания растет и устанавливается постоянной при балансе подводимого и уходящего тепла. При ультразвуковом резании процесс преобразования механической работы в теплоту носит импульсный, а отвод теплоты из зоны резания – колебательный характер. В установившемся тепловом режиме эти процессы, как и температура в зоне резания, становятся периодическими, причем устанавливается баланс поступающей и отводимой теплоты в среднем за период.

Температура в зоне резания зависит от свойств обрабатываемого материала и режимов резания и может достигать 500-600 °С. Вследствие зависимости механических свойств материала от температуры (рис.2,б,в) ее изменение оказывает влияние на характеристики процесса резания. Ниже приводятся некоторые результаты моделирования термомеханических процессов при резании образца. При моделировании

приняты следующие параметры (в дополнение к указанным ранее): $\lambda_{ст} = 45 \frac{Вт}{м \cdot К}$ – теплопроводность стали; $q = 500 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ – удельная теплоемкость; $\rho = 7800 \frac{кг}{м^3}$ – плотность; $\alpha_k = 50000 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ – коэффициент теплопередачи во время контакта резца и детали; $\alpha_p = 500 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ – коэффициент теплопередачи при разрыве контакта; $\alpha_{cp} = 0,05 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ – коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене материала детали с окружающей средой (воздухом). За начальную принята температура $0^\circ C$.

На рис. 5 приведена карта температур в зоне резания образца из стали. Из рисунка видно, что самая высокая температура наблюдается в области стружкообразования, где она достигает $100^\circ C$ непосредственно в зоне контакта. Довольно высокую температуру имеет также стружка и деталь в области под режущим инструментом. При удалении от зоны резания температура довольно быстро убывает, а на расстоянии 0,15 мм от зоны резания не превышает $25^\circ C$.

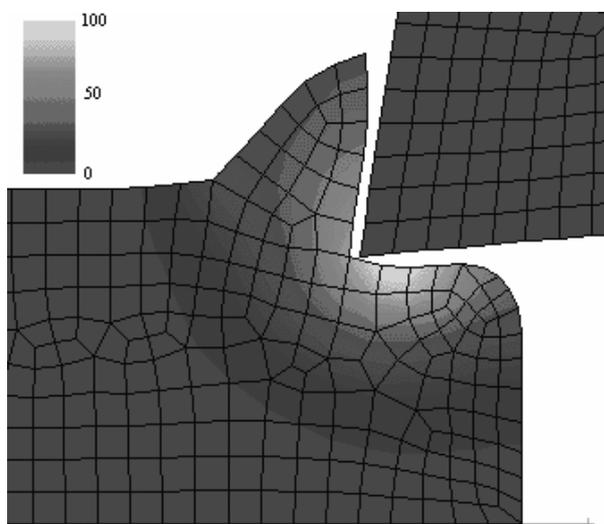


Рис. 5

Температурные режимы при традиционном и ультразвуковом резании существенно различаются, так как они определяются происходящими в зоне резания качественно различными процессами пластического деформирования и трения. При традиционном резании резец находится в постоянном контакте с изделием и поэтому имеют одинаковые температуры в областях контакта. Это, в частности, создает условия прилипания обрабатываемого материала к резцу и образования нароста на его передней поверхности. При ультразвуковом резании тепловая энергия выделяется в малой зоне обрабатываемого материала концентрированными импульсами с высокой плотностью потока энергии. Максимальная температура в импульсе выше, чем температура в зоне резания при традиционном резании, но условия отвода тепла оказываются более благоприятными из-за высокого перепада температур между зоной генерации тепла и ее окрестностью, в том числе с резцом. В результате, при прочих равных условиях, в установившихся режимах температура в рабочей зоне при ультразвуковом резании оказывается ниже, чем при

традиционном резании. Это в еще большей мере относится к температуре реза, что позитивно сказывается на его износостойкости при ультразвуковом резании.

Сравним теперь силы, действующие на резец в направлении скорости резания при его контакте с изделием в процессе ультразвукового резания при учете различных действующих факторов.

На рис. 6 показаны графики силы резания для задач с использованием ультразвука, причем кривые на рис.6,а получены при решении задачи с учетом, а на рис.6,б без учета влияния тепловых процессов.

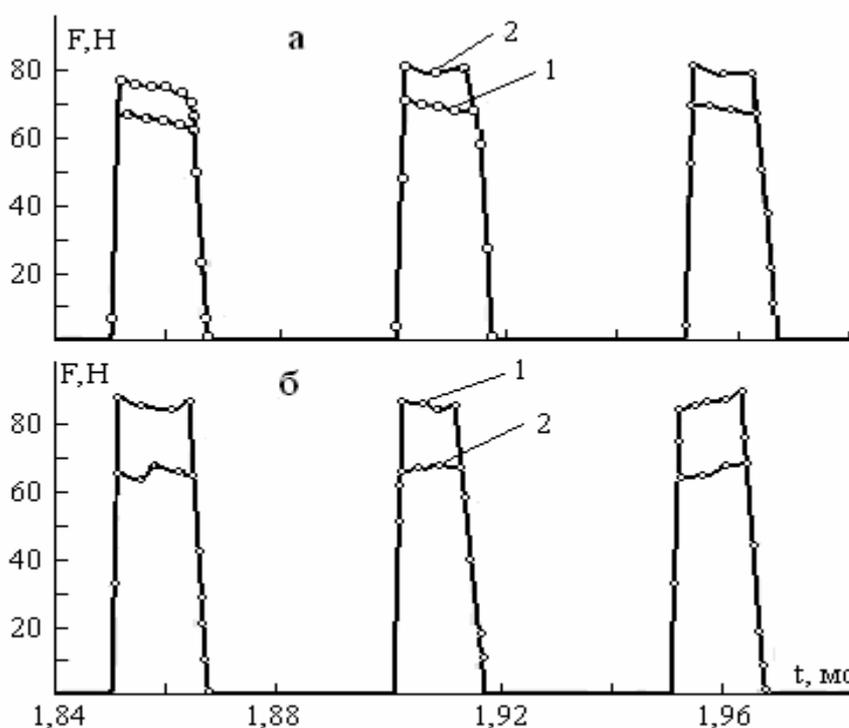


Рис. 6

На рисунках кривые 1 получены в предположении отсутствия трения; кривые 2 отражают влияние трения на силы резания. Прежде всего, обратим внимание на то, что в задаче с учетом влияния тепловых процессов сила резания уменьшается вследствие размягчения материала при повышении температуры в зоне резания. Из рисунков видно, что добавка к силе резания, определяемая силой трения, также зависит от температуры, причем величина этой добавки уменьшается с ростом температуры из-за уменьшения нормальной силы, действующей на резец. При расчетах предполагалось, что величина коэффициента трения не зависит от температуры трущихся поверхностей.

В заключение отметим, что полученные результаты хорошо коррелируют с известными экспериментальными данными и проведенными ранее расчетами. Хотя эти результаты носят в значительной мере качественный характер, они представляются весьма важными для понимания физики изучаемых процессов и открывают принципиальную возможность объяснения многих наблюдаемых эффектов, которые кратко упомянуты в начале статьи.

Литература

1. Грановский Г., Грановский В. Резание металлов. М.: Высшая школа. 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. 320 p.
9. Mitrofanov A.V., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Finite element modelling of ultrasonically assisted turning // Computational Materials Science. 2003. V.28. P. 645-653.
10. MSC. Marc User Guide Version 2005, MSC Software Corporation, Los Angeles.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.