

МЕХАНИКА

УДК: 539.3

А.Н. Шипачев, С.А. Зелепугин

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ¹**

Численно исследованы процессы высокоскоростного ортогонального резания металлов методом конечных элементов в рамках упругопластической модели среды в диапазоне скоростей резания 1 – 200 м/с. В качестве критерия отделения стружки применялось предельное значение удельной энергии сдвиговых деформаций. Выявлена необходимость использования дополнительного критерия стружкообразования, в качестве которого предложена предельная величина удельного объема микроповреждений.

Ключевые слова: *высокоскоростное резание, численное моделирование, метод конечных элементов.*

С физической точки зрения процесс резания материалов является процессом интенсивного пластического деформирования и разрушения, сопровождаемым трением стружки о переднюю поверхность резца и трением задней поверхности инструмента о поверхность резания, происходящих в условиях высоких давлений и скоростей скольжения. Затрачиваемая при этом механическая энергия переходит в тепловую, которая в свою очередь оказывает большое влияние на закономерности деформирования срезаемого слоя, силы резания, износ и стойкость инструмента [1].

Продукция современного машиностроения характеризуется использованием высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, резким повышением требований к точности и качеству изделий и значительным усложнением конструктивных форм деталей машин, получаемых обработкой резанием. Поэтому процесс механической обработки требует постоянного совершенствования. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений такого совершенствования является высокоскоростная обработка.

В научной литературе теоретические и экспериментальные исследования процессов высокоскоростного резания материалов представлены крайне недостаточно. Имеются отдельные примеры экспериментально-теоретических исследований влияния температуры на прочностные характеристики материала в процессе высокоскоростного резания [2]. В теоретическом плане проблема резания материалов получила наибольшее развитие в создании ряда аналитических моделей ортогонального резания [3 – 5]. Однако сложность проблемы и необходимость более полного учета свойств материалов, тепловых и инерционных эффектов привели к

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 07-08-00037, 08-08-12055), РФФИ и Администрации Томской области (проект 09-08-99059), Минобрнауки РФ в рамках АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/5993).

использованию численных методов, из которых применительно к рассматриваемой задаче наибольшее распространение получил метод конечных элементов.

Постановка задачи

В данной работе процессы высокоскоростного резания металлов исследуются численно методом конечных элементов в двумерной плоскодеформационной постановке в рамках упругопластической модели среды.

В численных расчетах используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся возможностью зарождения и развития в ней трещин. Общий объем среды W составляют ее неповрежденная часть, занимающая объем W_c и характеризующаяся плотностью ρ_c , а также занимающие объем W_f трещины, в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_c (W_c / W)$. Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом трещин $V_f = W_f / (W \rho)$.

Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое (как при упругом, так и при пластическом деформировании) движение сжимаемой среды состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии [6 – 8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\rho d v_i}{dt} = \sigma_{ij,j}; \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

где ρ – плотность, t – время, $\mathbf{v}$ – вектор скорости с компонентами v_i , $\sigma_{ij} = -(P+Q)\delta_{ij} + S_{ij}$ – компоненты тензора напряжений, E – удельная внутренняя энергия, ε_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, $P = P_c (\rho/\rho_c)$ – среднее давление, P_c – давление в сплошной компоненте (неповрежденной части) вещества, Q – искусственная вязкость, S_{ij} – компоненты девиатора напряжений.

Моделирование «отрывных» разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа [9]:

$$\frac{dV_f}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0), \\ -\operatorname{sign}(P_c) K_f (|P_c| - P^*)(V_2 + V_f), & \\ \text{если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0). \end{cases} \quad (4)$$

При создании модели предполагалось, что в материале имеются потенциальные очаги разрушения с эффективным удельным объемом V_1 , на которых образуются и растут трещины (или поры) при превышении растягивающим давлением P_c некоторой критической величины $P^* = P_k V_1 / (V_1 + V_f)$, которая уменьшается по мере роста образовавшихся микроповреждений. Константы V_1 , V_2 , P_k , K_f подбирались путем сопоставления результатов расчетов и экспериментов по регистрации скорости тыльной поверхности при нагружении образца плоскими импульсами сжатия. Один и тот же набор констант материала используется при расчете как роста, так и схлопывания трещин или пор в зависимости от знака P_c .

Давление в неповрежденном веществе считается функцией удельного объема и удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения опреде-

ляется с помощью уравнения состояния типа Ми – Грюнайзена, в котором коэффициенты подбираются на основе констант a и b ударной адиабаты Гюгоннио.

Определяющие соотношения связывают компоненты девиатора напряжений и тензора скоростей деформаций и используют производную Яуманна. Для описания пластического течения используется условие Мизеса. Учтены зависимости прочностных характеристик среды (модуля сдвига G и динамического предела текучести σ) от температуры и уровня поврежденности материала [9,10].

Моделирование процесса отделения стружки от заготовки осуществлялось с использованием критерия разрушения расчетных элементов заготовки, при этом использовался подход, аналогичный имитационному моделированию разрушения материала эрозионного типа. В качестве критерия разрушения – критерия отделения стружки – применялось предельное значение удельной энергии сдвиговых деформаций E_{sh} . Текущее значение этой энергии вычисляется с помощью формулы:

$$\rho \frac{d E_{sh}}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций зависит от условий взаимодействия и задается функцией начальной скорости удара:

$$E_{sh}^c = a_{sh} + b_{sh} v_0, \quad (6)$$

где a_{sh} , b_{sh} – константы материала. Когда $E_{sh} > E_{sh}^c$ в расчетной ячейке, эта ячейка считается разрушенной и удаляется из дальнейшего расчета, а параметры соседних ячеек корректируются с учетом законов сохранения. Корректировка заключается в удалении массы разрушенного элемента из масс узлов, принадлежавших этому элементу. Если при этом масса какого-либо расчетного узла становится нулевой, то данный узел считается разрушенным и также удаляется из дальнейшего расчета.

Результаты расчетов

Расчеты проводились для скоростей резания от 1 до 200 м/с. Размеры рабочей части инструмента: длина верхней грани 1,25 мм, боковой 3,5 мм, передний угол 6° , задний угол 6° . Обрабатываемая стальная пластина имела толщину 5 мм, длину 50 мм, глубина резания – 1 мм. Материал обрабатываемой заготовки – сталь Ст3, материал рабочей части инструмента – плотная модификация нитрида бора. Были использованы следующие значения констант материала обрабатываемой заготовки [11]: $\rho_0 = 7850$ кг/м³, $a = 4400$ м/с, $b = 1,55$, $G_0 = 79$ ГПа, $\sigma_0 = 1,01$ ГПа, $V_1 = 9,2 \cdot 10^{-6}$ м³/кг, $V_2 = 5,7 \cdot 10^{-7}$ м³/кг, $K_f = 0,54$ м·с/кг, $P_k = -1,5$ ГПа, $a_{sh} = 7 \cdot 10^4$ Дж/кг, $b_{sh} = 1,6 \cdot 10^3$ м/с. Материал рабочей части инструмента характеризуется константами $\rho_0 = 3400$ кг/м³, $K_1 = 410$ ГПа, $K_2 = K_3 = 0$, $\gamma_0 = 0$, $G_0 = 330$ ГПа, где K_1 , K_2 , K_3 – константы уравнения состояния в форме Ми – Грюнайзена.

Результаты расчета процесса образования стружки при движении резца со скоростью 10 м/с представлены на рис. 1. Из расчетов следует, что процесс резания сопровождается интенсивной пластической деформацией обрабатываемой заготовки в окрестности вершины резца, что при образовании стружки приводит к сильному искажению первоначальной формы расчетных элементов, расположенных вдоль линии резания. В данной работе использованы линейные треугольные элементы, которые при используемом в расчетах необходимом малом шаге по времени обеспечивают устойчивость расчета при значительном их деформировании,

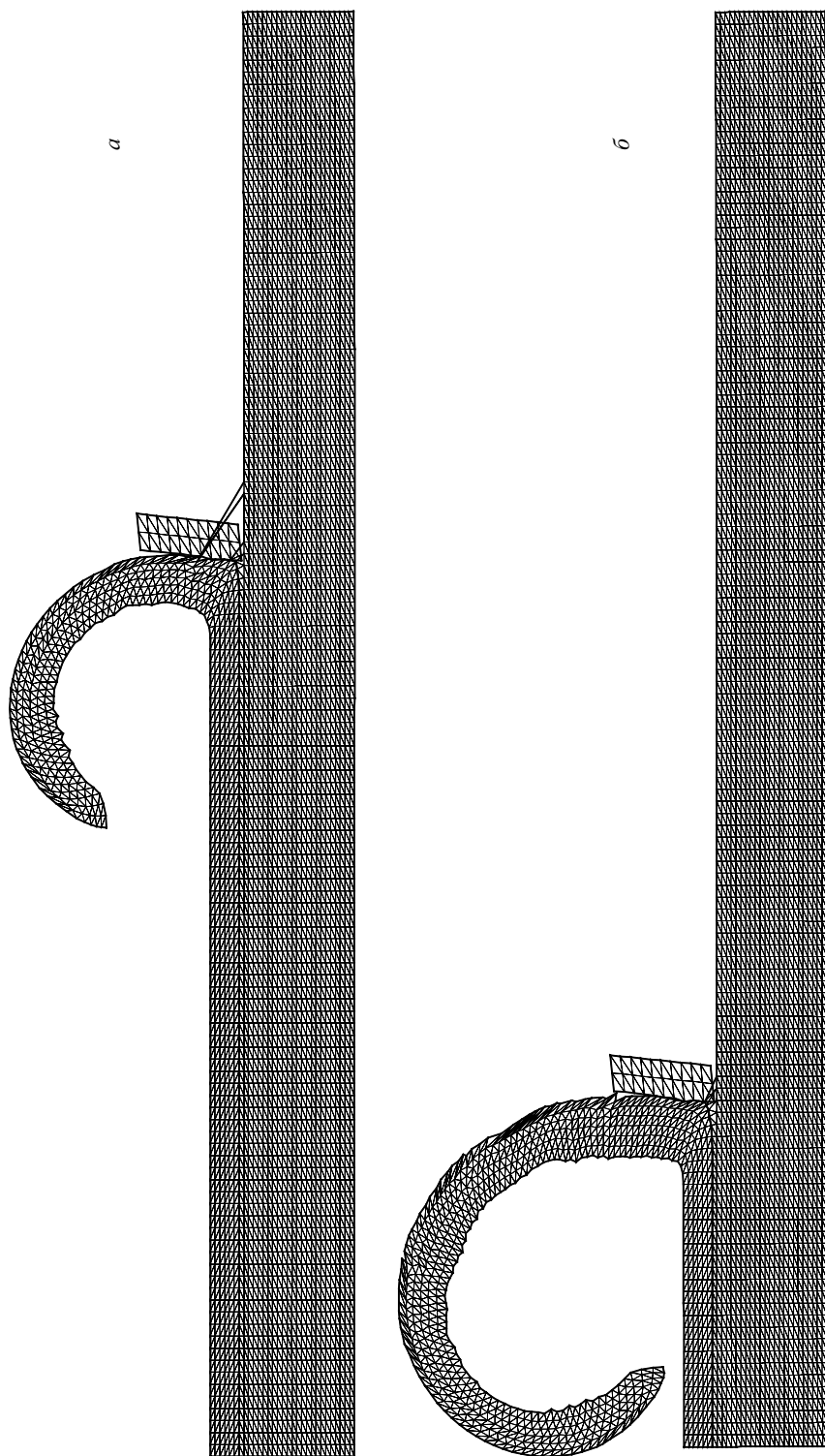


Рис. 1. Форма стружки, заготовки и рабочей части режущего инструмента в моменты времени 1,9 мс (а) и 3,8 мс (б) при движении резца со скоростью 10 м/с

вплоть до выполнения критерия отделения стружки. При скоростях резания 10 м/с и ниже в образце возникают области, где несвоевременно срабатывает критерий отделения стружки (рис. 1, *а*), что свидетельствует о необходимости применения или дополнительного критерия, или замены используемого критерия на новый. Дополнительно на необходимость корректировки критерия стружкообразования указывает форма поверхности стружки.

На рис. 2 показаны поля температуры (в К) и удельной энергии сдвиговых деформаций (в кДж/кг) при скорости резания 25 м/с в момент времени 1,4 мс после начала резания. Расчеты показывают, что поле температур практически идентично полю удельной энергии сдвиговых деформаций, что свидетельствует о том, что

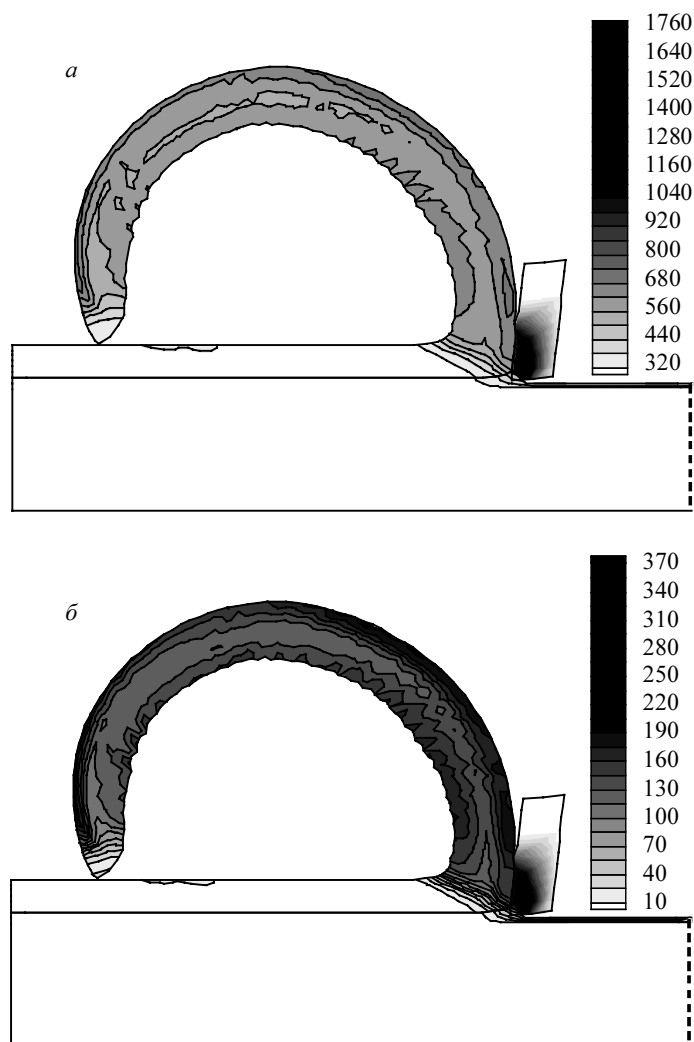


Рис. 2. Поля и изолинии температуры (*а*) и удельной энергии сдвиговых деформаций (*б*) в момент времени 1,4 мс при движении резца со скоростью 25 м/с

температурный режим при высокоскоростном резании определяется в основном пластическим деформированием материала заготовки. В данном случае максимальные значения температуры в стружке не превышают 740 К, в заготовке – 640 К. В процессе резания в резце возникают существенно более высокие температуры (рис. 2, а), которые могут приводить к деградации его прочностных свойств.

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показывают, что градиентные изменения удельного объема микроповреждений перед резцом выражены значительно сильнее, чем изменения энергии сдвиговых деформаций или температуры, поэтому в расчетах в качестве критерия отделения стружки можно использовать (самостоятельно или дополнительно) предельную величину удельного объема микроповреждений.

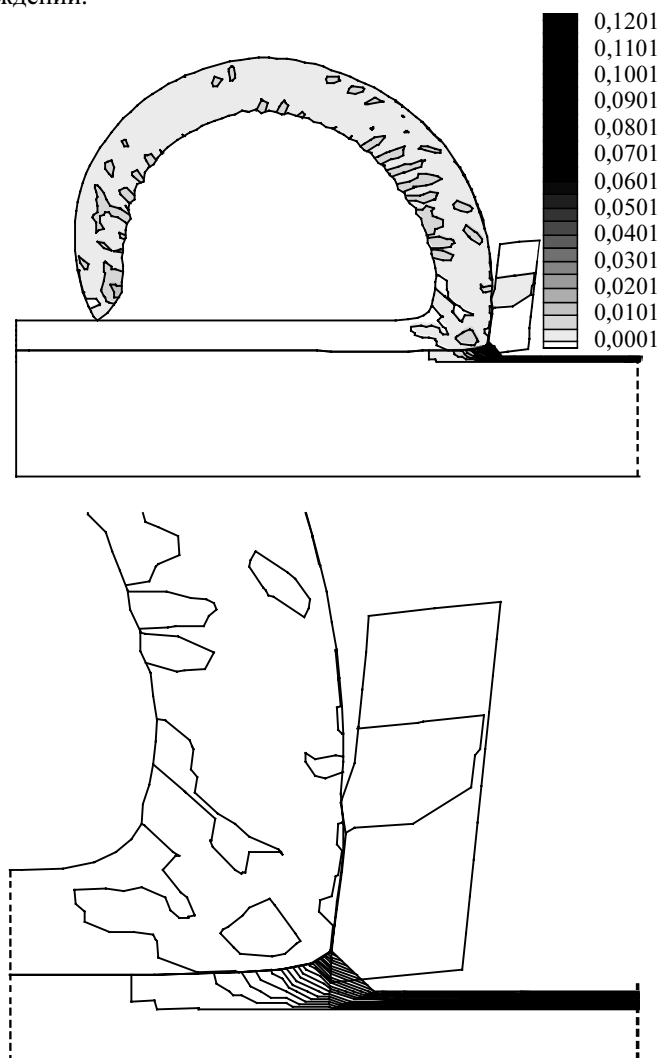


Рис. 3. Поля удельного объема микроповреждений (в $\text{см}^3/\text{г}$) в момент времени 1,4 мс при движении резца со скоростью 25 м/с

Заключение

Численно исследованы процессы высокоскоростного ортогонального резания металлов методом конечных элементов в рамках упругопластической модели среды в диапазоне скоростей резания 1 – 200 м/с.

На основании полученных результатов расчетов установлено, что характер распределения линий уровня удельной энергии сдвиговых деформаций и температур при сверхвысоких скоростях резания такой же, как и при скоростях резания порядка 1 м/с, а качественные различия в режиме могут возникать вследствие плавления материала заготовки, которое происходит лишь в узком контактируемом с инструментом слое, а также вследствие деградации прочностных свойств материала рабочей части инструмента.

Выявлен параметр процесса – удельный объем микроповреждений, – предельная величина которого может быть использована в качестве дополнительного или самостоятельного критерия стружкообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин С.И. Оптимальное проектирование рабочей части режущих инструментов // Томск: Изд-во Том. политехнического университета, 2008. 195 с.
2. Sutter G., Ranc N. Temperature fields in a chip during high-speed orthogonal cutting – An experimental investigation // Int. J. Machine Tools & Manufacture. 2007. No. 47. P. 1507 – 1517.
3. Miguelez H., Zaera R., Rusinek A., Moufki A. and Molinari A. Numerical modelling of orthogonal cutting: Influence of cutting conditions and separation criterion // J. Phys. 2006. V. IV. No. 134. P. 417 – 422.
4. Hortig C., Svendsen B. Simulation of chip formation during high-speed cutting // J. Materials Processing Technology. 2007. No. 186. P. 66 – 76.
5. Campbell C.E., Bendersky L.A., Boettinger W.J., Ivester R. Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining // Materials Science and Engineering A. 2006. No. 430. P. 15 – 26.
6. Зелепугин С.А., Коняев А.А., Сидоров В.Н. и др. Экспериментально-теоретическое исследование соударения группы частиц с элементами защиты космических аппаратов // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 6. С. 559 – 570.
7. Зелепугин С.А., Зелепугин А.С. Моделирование разрушения преград при высокоскоростном ударе группы тел // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 3. С. 71 – 76.
8. Иванова О.В., Зелепугин С.А. Условие совместного деформирования компонентов смеси при ударно-волновом компактировании // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2009. № 1(5). С. 54 – 61.
9. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Исследования механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении // Известия РАН. МТТ. 1999. № 5. С. 173 – 188.
10. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение двуслойной преграды карбид бора – титановый сплав при высокоскоростном ударе // Изв. вузов. Физика. 2008. № 8/2. С. 166 – 173.
11. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Применение метода конечных элементов для исследования ортогонального резания металлов инструментом из СТМ с учетом разрушения и температурных эффектов // Сверхтвердые материалы. 1995. № 5. С. 33 – 38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

ШИПАЧЕВ Александр Николаевич – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета. E-mail: alex18023@mail.ru

ЗЕЛЕПУГИН Сергей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета Томского государственного университета, старший научный сотрудник Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. E-mail: szel@dsm.tsc.ru, szel@yandex.ru

Статья принята в печать 19.05.2009 г.