

2. При испытании материалов резанием влияние инерционных сил на сопротивление деформированию пренебрежимо мало до $\dot{\epsilon}_i = 10^7 \text{ с}^{-1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лира Ф. Томсен Е. Процесс резания как метод испытания свойств материалов. /Труды Американского общества инженеров механиков, с. В, 1967, № 3. С. 129-135.
2. Гольдшмидт М.Г., Шлякман Б.М. Метод получения диаграмм пластического деформирования при высоких скоростях с использованием процесса резания. // Заводская лаборатория. 1976. № 11. С. 1396-1398.
3. Суяров Д.И., Лель Р.В., Акс В.Ю., Козеева Н.И. Оценка величины динамического сопротивления при пластическом сжатии образцов с высокой скоростью. //Труды института металлургии Уральского филиала АН СССР. – Свердловск: 1966. Вып. 12. С. 107-115.
4. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. – Томск: Изд-во СТТ, 2001. – 180с.

Томский политехнический университет

УДК 621.9.01

М.Г. ГОЛЬДШМИДТ, Ю.П. СТЕФАНОВ, П.В. МАКАРОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛИВНОГО СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Приведены некоторые результаты численного моделирования процесса ортогонального резания металлов; рассмотрена «установившаяся» стадия процесса. Решением системы уравнений механики сплошной среды конечно-разностным методом получены «аналитические делительные сетки», компоненты деформаций и напряжений в зоне резания, в частности распределение напряжений вдоль условной линии сдвига, на передней поверхности инструмента, напряжения в слоях металла примыкающих к обработанной поверхности.

Введение

Большое количество публикаций, посвященных анализу процесса обработки металлов резанием методами математического моделирования, говорит о неистощающемся интересе специалистов к данной проблеме. Продолжается разработка моделей процесса резания, ориентированных на изучение напряженно-деформированного состояния в зоне стружкообразования, влияния скорости деформации и температуры, закономерностей формирования поверхностного слоя. О широком интересе к данной проблеме свидетельствуют опубликованные в последнее время работы Вейца В.Л. и Максарова В.В. по моделированию процесса стружкообразования при лезвийной обработке [1], Behrens Arno и Westhoff Bert по применению метода конечных элементов для исследования процесса высокоскоростного резания [2], а также ряд других работ [3–8], посвященных численному моделированию.

Постановка задачи и метод решения

Изучение процесса деформирования методами численного моделирования позволяет получить напряженно-деформированное состояние в расчетной области. Это осуществля-

ется путем численного решения системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения. Система уравнений решается при заданных начальных и граничных условиях.

В работе поставлена задача создания математической модели, ориентированной на анализ как установившегося, так и ударного процессов. Модель предназначена для исследования пластического течения металла в зоне стружкообразования, расчета скоростей деформации, напряжений в условной плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента, исследования напряжений в слоях металла, расположенных на различной удаленности от обработанной поверхности, создания базы для изучения нестационарных процессов: врезания инструмента, прерывистого резания, напряжений в условиях элементного и псевдоэлементного стружкообразования и т.п.

Настоящая работа является в известном смысле продолжением первых опытов по численному моделированию ортогонального резания металлов в двумерной динамической постановке [9].

Система уравнений

Процесс рассмотрен в двумерной динамической постановке с использованием лагранжева описания движения среды. Метод решения задачи аналогичен известному конечно-разностному методу НЕМР, поэтому система уравнений Прандтля–Рейса записывается в том же виде, что и в [10], где подробно изложен данный метод.

Уравнения движения имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_x, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_y; \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\dot{E} = -P\dot{V} + (s_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + s_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + 2 \cdot s_{xy}\dot{\epsilon}_{xy}) \cdot V. \quad (3)$$

Скорости деформации

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right). \quad (4)$$

В условиях плоской деформации $u_z = 0$, $\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zz} = 0$.

Скорость вращения

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{xy} = -\dot{\omega}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Полная деформация включает в себя упругую и пластическую части

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^{pl}. \quad (6)$$

Тензор напряжений σ_{ij} разбивается на девиаторную s_{ij} и шаровую P части

$$\sigma_{xx} = -P + s_{xx}, \quad \sigma_{yy} = -P + s_{yy}, \quad \sigma_{xy} = s_{xy}. \quad (7)$$

Девииатор напряжений с учетом поворота локальной системы координат определяется как

$$\begin{aligned} \dot{s}_{xx} &= 2\mu \left(\dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \dot{V}/V \right) + \varpi_{xx}; \\ \dot{s}_{yy} &= 2\mu \left(\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} \dot{V}/V \right) + \varpi_{yy}; \\ \dot{s}_{xy} &= 2\mu (\dot{\epsilon}_{xy}) + \varpi_{xy}, \end{aligned} \quad (8)$$

где ϖ — поправка, учитывающая поворот элемента среды.

Гидростатическое давление

$$\dot{P} = -K \frac{\dot{V}}{V}, \quad (9)$$

где $V = \rho_0/\rho$ — относительный объем.

Условие пластичности Мизеса

$$2J_2 - \frac{2}{3} Y^2 \leq 0, \quad (10)$$

где $2J_2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$, Y — предел текучести при растяжении.

В качестве меры упрочнения принята работа пластической деформации W^{pl}

$$Y = Y(W^{pl}) = Y_0 + \alpha (W^{pl})^\beta \text{ Мбар}. \quad (11)$$

При записи уравнений использовались следующие обозначения:

x, y — пространственные координаты; u_x, u_y, u_z — компоненты вектора скорости; ϵ_{ij} — компоненты тензора деформации; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; s_{ij} — компоненты девиатора напряжений; P — давление; E — удельная энергии; ρ — плотность; ρ_0 — первоначальная плотность среды; V — относительный объем; K — модуль объемного сжатия; μ — модуль сдвига. Точка сверху означает производную по времени.

Суть метода расчета состоит в следующем.

1. На исследуемый объект наносится сетка, фрагмент которой показан на рис. 1, б, т.е. осуществляется дискретизация расчетной области.
2. На построенной расчетной сетке осуществляется решение системы уравнений механики сплошной среды. Рассчитываются движение сетки и напряженно-деформированное состояние в каждой из ячеек. При этом полагается, что поведение расчетной сетки и состояние всех ячеек соответствуют поведению и состоянию реального, но идеализированного объекта.

Для осуществления расчетов потребовалось ввести ряд модификаций в принятую за основу расчетную схему, в том числе связанных со стабилизацией сетки. Наиболее широко используемые алгоритмы стабилизационных или искусственных вязкостей изложены в работах [10, 12]. Например, в применяемой угловой или треугольной искусственной вязкости используются не прямоугольные, как в основной схеме, а треугольные элементы, которые обеспечивают дополнительную жесткость и устойчивость сетки к некоторым видам деформации, вызывающим прогрессирующее трапециевидное искажение формы расчетных ячеек. Наибольшие искажения сетки, в том числе и указанные, которые не всегда имеют отношение к физическим процессам, имеют место на стадии формирования стружки.

Требуемое количество временных интервалов для изучения интересующего явления огромно. Это естественным образом вызывало опасения, что накопленная вычислительная погрешность будет такова, что результаты расчетов не будут соответствовать решению поставленной задачи. Однако тестовые расчеты на сетках различных размеров дали практически идентичную картину, что позволяет сделать заключение о достаточно хорошей сходимости решений [9].

Отделение срезаемого слоя при его превращении в стружку производилось путем разделения узлов лагранжевой расчетной сетки вдоль линии среза (рис 1, а). После разделения узел, который принадлежал внутренней области, превращался в два граничных, один из которых лежал на поверхности стружки, а другой — на поверхности заготовки. Таким образом, перед лезвием режущего клина по линии резания развивалась трещина со скоростью движения инструмента, причем вершина трещины могла опережать лезвие инструмента не более, чем на длину счетной ячейки.

Момент разделения определяется по некоторому критерию, который может включать в себя как геометрические параметры, так и параметры напряженно-деформированного состояния в окрестности лезвия инструмента. В данных расчетах разрушение материала не рассматривалось, поэтому при отделении срезаемого слоя во внимание принимались лишь геометрические параметры. Эта операция осуществлялась, когда расстояние между лезвием инструмента и узлом вдоль линии среза оказывалось менее заданной величины.

Задача решалась при следующих граничных условиях: нижняя поверхность заготовки неразрывно связана с неподвижным жестким основанием; на всех внешних границах, за исключением области контакта с режущим инструментом заданы условия свободной поверхности $\sigma_{ij;n_j} = 0$; на передней грани инструмента — коэффициент трения.

Резец представлял собой абсолютно жесткое тело, радиус скругления режущего лезвия равен нулю.

Обрабатываемая деталь имела прямоугольную форму и была неподвижно закреплена на жестком основании. Режущий инструмент двигался с постоянной скоростью $V_{рез}$ в горизонтальном направлении навстречу заготовке. Такая схема соответствует процессу ортогонального резания инструментом с передним углом γ .

При решении задачи были выбраны следующие геометрические параметры заготовки: длина заготовки $L=32a$, толщина $H=7.5a$; толщина срезаемого слоя $a=0,1$ мм. Расчетная сетка состояла из 160×75 прямоугольных ячеек.

Использовались следующие константы обрабатываемого материала:

$K=180$ ГПа, $\mu=80$ ГПа, $\rho=7,85$ г/мм³, $Y_0=0,4$ ГПа, $\alpha=1/150$, $\beta=0.2$. Расчеты проводились для скорости резания $V_{рез}=10$ м/с, переднего угла $\gamma=10^\circ$, 17° и 24° и значениях коэффициента трения $f = 0; 0,1; 0,2; 0,4$.

Результаты расчетов

На рис. 2 приведено полученное при исследовании модели распределение интенсивности напряжений в зоне стружкообразования при резании резцом с передним углом 17° упруго-идеальнопластического материала при отсутствии трения на передней грани. Ве-

личина интенсивности напряжений определялась как $\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2}$.

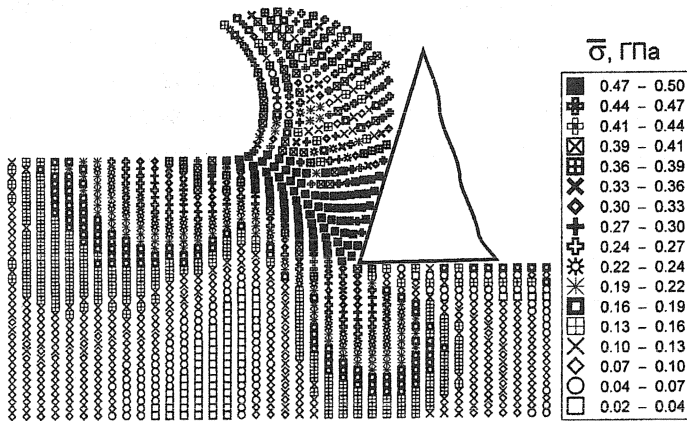


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений в области формирования стружки. (Материал упруго-идеальнопластический, $Y=0,5$ ГПа, трение отсутствует)

Квадратные черные значки обозначают ячейки, в которых интенсивность напряжений принимает значения $0,47 \div 0,5$ ГПа. При заданном значении предела текучести $0,5$ ГПа, зону, помеченную этими значками, можно считать пластической областью. Хорошо видно, что пластическое течение материала сосредоточено вблизи условной плоскости сдвига и передней грани инструмента. На рис. 2 также достаточно четко просматриваются зоны упругого сжатия (впереди резца) и растяжения (под резцом), в которых интенсивность напряжений не превышает $0,16 \dots 0,19$ ГПа.

Известно, что поведение материала, не обладающего свойствами деформационного упрочнения (или описываемого в таких рамках), имеет тенденцию к локализации пластической деформации. В связи с этим использование данной модели может оказаться полезным для выделения наиболее активной зоны деформации.

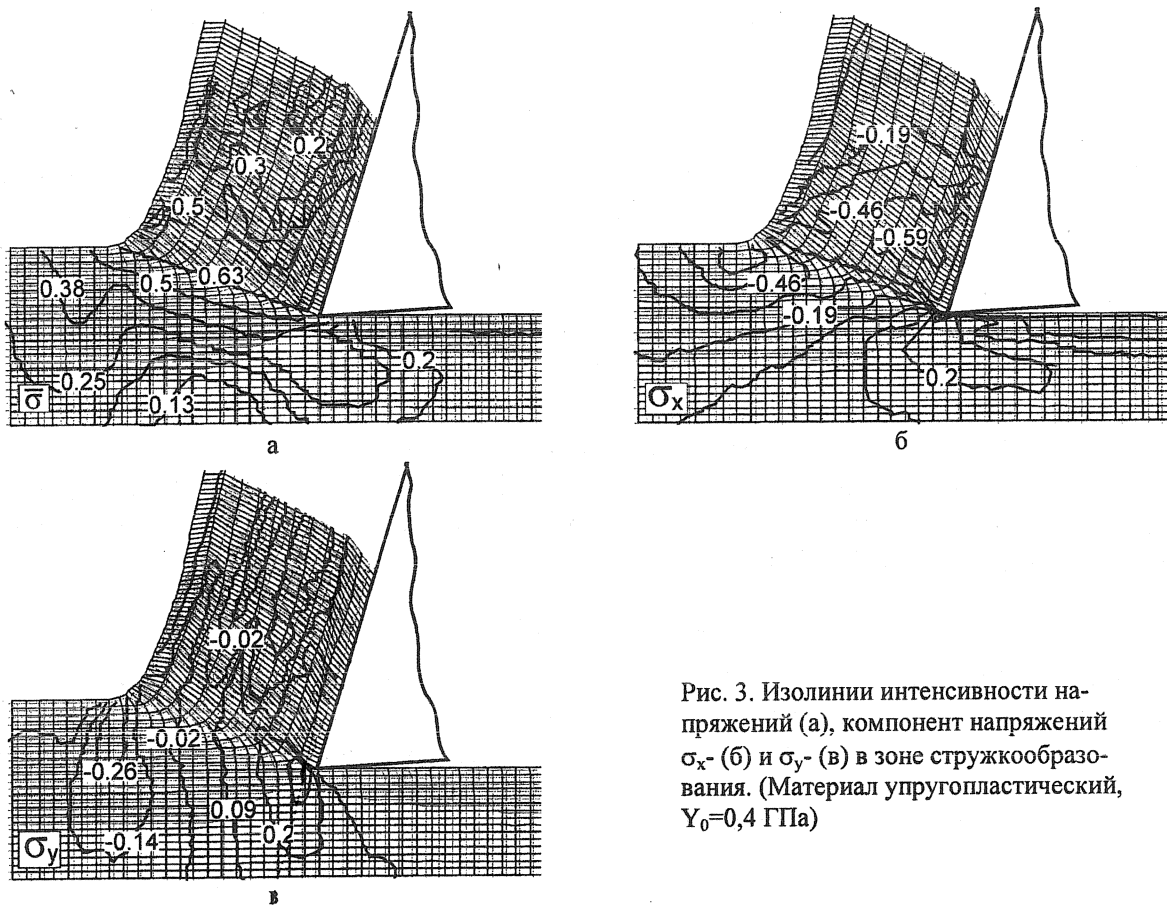


Рис. 3. Изолинии интенсивности напряжений (а), компонент напряжений σ_x - (б) и σ_y - (в) в зоне стружкообразования. (Материал упругопластический, $Y_0=0,4$ ГПа)

Для случая «резания» упрочняющегося материала (рис. 3) также хорошо видны две области с высоким уровнем напряжений. Это область растяжения вблизи лезвия инструмента и область сжатия, расположенная у свободной поверхности впереди условной плоскости сдвига. Причем сжатие и растяжение наблюдаются по обоим компонентам напряжений (σ_x, σ_y), хотя формы этих областей существенно различаются. На «корнях стружек» заметны зоны со сжимающими напряжениями (отмеченные знаком «минус») и растягивающими напряжениями σ_x и σ_y . Последние расположены не только ниже лезвия, что естественно, но и захватывают зону впереди лезвия инструмента.

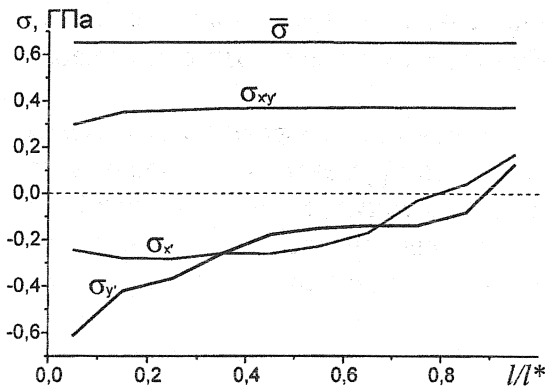


Рис. 4. Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига ($l^*=0.262$ мм)

В отличие от рассмотренного выше случая резания упруго-идеальнопластического материала, в материале с упрочнением пластическая зона охватывает более обширную область и имеет более сложную форму. Пластическое течение материала начинается значительно раньше, чем частицы металла оказываются на условной плоскости сдвига, угол наклона которой существенно меньше.

Необходимо заметить, что напряженное состояние не является неизменным в течение процесса. Как физически, так и численно это обусловлено неравномерностью разрушения материала перед лезвием резца. Очевидно, что дискретизация этого процесса связана с технологией численного расчета и значительно усиливает неравномерность. В момент разделения очередного узла сетки происходит разгрузка материала в прилегающей области и излучение упругих волн. Понятно, что в такой ситуации уровень напряжений вблизи лезвия будет циклически меняться, а картина распределения напряжений зависит от местоположения лезвия инструмента в пределах расчетной ячейки, т.е. от момента времени. Именно с этим связана «неплавность» линий на всех представленных на рис. 3 фрагментах, а также осциллирующий вид кривых на остальных рисунках.

На рис. 4 представлены результаты расчета напряжений, действующих на условной линии сдвига (условия резания те же, что и на рис. 3), на рис. 5 — изменение интенсивности скорости деформации частиц металла на пути превращения их в стружку. Изменение интенсивности скорости деформации $\dot{\epsilon}_i$, аналогично определяемым экспериментально,

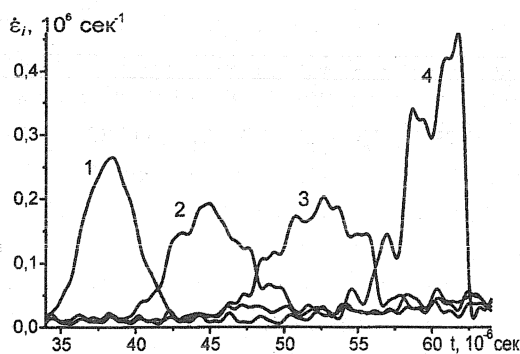


Рис. 5. Изменение интенсивности скорости деформации с течением времени

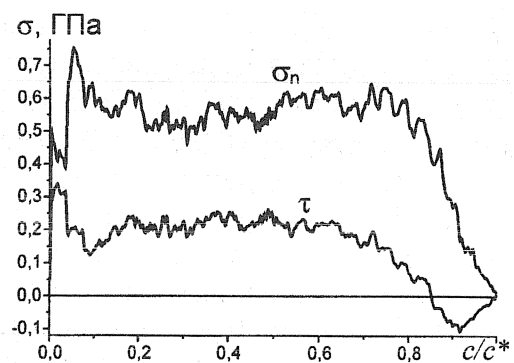


Рис. 6. Нормальная и касательная компоненты напряжений в слое стружки по длине контакта с резцом ($c^*=0,196$ мм)

вначале плавно, затем вблизи условной линии сдвига резко возрастает, после чего падает до нуля [11].

Наибольшая скорость деформации имеет место в слое, прилегающем к лезвию инструмента (кривая 4, рис. 5), наименьшая — в срединных слоях. Однако, после прохождения условной линии сдвига, скорость деформации по всему сечению остается близкой к ее величине в срединных слоях при прохождении условной плоскости сдвига. При этом отрезок времени активной деформации существенно превышает период наиболее высокоскоростной пластической деформации.

На рис. 6 представлены эпюры нормальных и касательных напряжений в слое металла, примыкающем к передней грани инструмента. Кривые σ_n и τ имеют типичный характер.

Сжатие материала, которое наблюдается в области, лежащей впереди лезвия, сменяется интенсивным растяжением при приближении лезвия инструмента; это хорошо видно на рис. 3 и 7. Если вертикальная компонента напряжений (в силу граничных условий) после прохождения резца обращается в ноль (рис. 7, б), то для горизонтальной составляющей ситуация сильно отличается. Верхние слои уже обработанной детали вновь оказываются в состоянии сжатия (рис. 7, а).

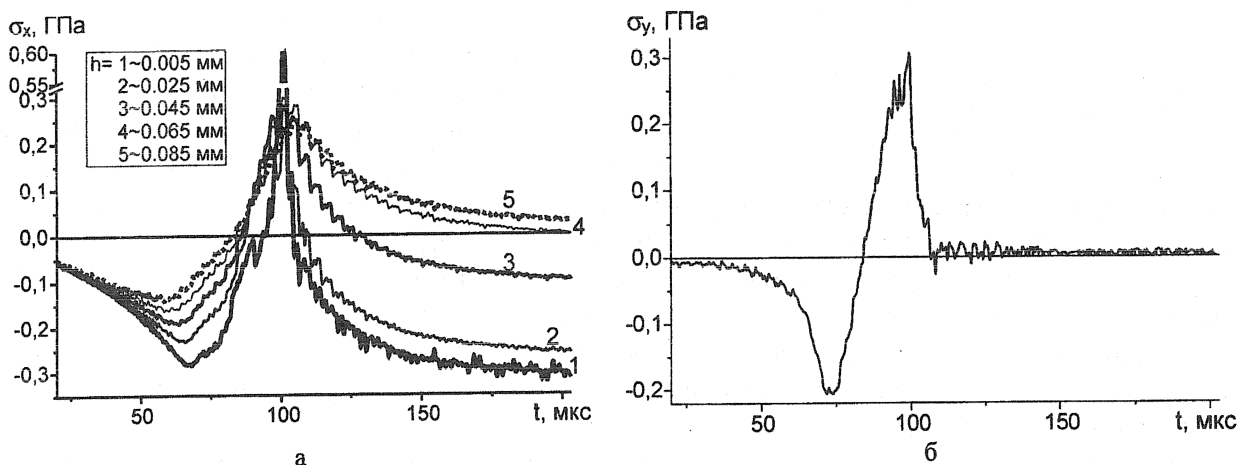


Рис. 7. Изменение σ_x -компоненты напряжений по глубине образца (а) и σ_y -компоненты напряжений в поверхностном слое ($h \approx 0,05$ мм) (б) с течением времени или по мере продвижения резца

Заключение

В разработанной численной модели в качестве установочных параметров были использованы исходная геометрия инструмента, коэффициент трения и свойства материала заготовки. К числу модельных идеализаций относятся постоянная толщина срезаемого слоя и соответствующая схема разрушения или отделения срезаемого слоя; модель упругопластического поведения материала; закон трения с постоянным коэффициентом. Очевидно, что ряд явлений в связи с этим остался за рамками рассмотрения.

Несмотря на это, представленная численная модель достаточно хорошо описывает многие явления процесса резания. Возможно и дальнейшее уточнение расчетов путем учета влияния температуры, задания переменного закона трения на передней грани и т.п.

Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным.

Следует заметить, что хотя термин «установившийся процесс» (в контексте процесса сливного стружкообразования) является общепринятым, он говорит скорее об идеализации, позволяющей существенно облегчить анализ процесса, чем о его физической природе.

Разработанная модель процесса резания обладает большими возможностями; она может оказаться полезной для широкого исследования вопросов механики сливного стружкообразования, а также нестационарных процессов резания металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейц В.Л., Максаров В.В. Моделирование процесса стружкообразования при лезвийной механической обработке. IV Международный конгресс «Конструкторско-технологическая информатика 2000». Москва, 2000: КТИ-2000: Тр. конгр. Т1. М.2000. С. 109–112.
2. Recent progress and some difficulties in computational modeling of machining / Shirakashi T., Obikama T. // Mach. Sci. and Technol. – 1998. – V. 2. – No. 2. – С. 277–301.
3. Behrens Arno, Westhoff Bert, Finite element modelling of high speed machining processes // 2nd Int. Germ. and French. Conf. High Speed Mach., Darmstadt. March 10 – 11, 1999. – Darmstadt, 1999. – P. 185–190.
4. Material constitutive modeling under high strain rates and temperatures through orthogonal machining tests / Lei S., Shin Y.C. Ineropera F.P. // Trans. ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 1999. – V. 121, No. 4. – С. 577–585.
5. Machining as a wedge indentation / Madhavan V., Chandrasekar S., Farris T.N. Trans. ASME J. Appl. Mech. – 2000. – V. 67. – No. 1. – С. 128–139.
6. Стивенсон Д.А., Ву С.М. Моделирование на ЭВМ механики процессов объемного резания. Часть I. Теория и метод моделирования // Конструирование и технология машиностроения. – 1988. – № 4. – С. 19–29.
7. Стренковский Д.С., Керрол Д.Т. Конечно-элементная модель ортогонального резания металла // Конструирование и технология машиностроения. Труды американского общества инженеров-механиков. Серия Б. – 1985. – № 4. – С. 192–202.
8. Lin S.Y. Surface waviness removed by orthogonal machine cutting // Theor. and Appl. Frac. Mech. – 1997. – V. 29/2. – P. 69–80.
9. Stefanov Yu.P., Makarov P.V., Burkov P.V., Matveev V.S. Dynamic simulation of chip generation and formation in metal cutting // Theor. and Appl. Frac. Mech. – 1997. – V. 28/2. – P. 117–124.
10. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений / Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
11. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. – Томск: STT, 2001. – 180 с.
12. Wilkins M.L. Use of Artificial Viscosity in Multidimensional Fluid Dynamic Calculation // Jour. Comp. Phys. – 1980. – V. 36. – P. 281–303.
13. Гриднева В.А., Немирович-Данченко М.М. Метод раздвоения точек сетки для численного расчета разрушения твердых тел. – Томск, 1983. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 14.06.83, № 3258.
14. Chen Y.M., Wilkins M.L. Stress Analysis of Crack Problems by a Three-dimensional, Time-dependent computer program // Int. J. Fract. – 1976. – V. 12(4). – P. 607–617.
15. Descombes C., Farget A., LeRoux A.Y., An augmented Lagrangian formulation for dynamics contact/impact problems in an explicit Lagrangian finite element code // International Workshop on New Models and Numerical Codes for Wave Processes in Condensed Media, (AWE Hunting – Brae, Great Britain, 1997. P. 762–772).
16. Гулидов А.И., Шабалин И.И. Численная реализация граничных условий в динамических контактных задачах – Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1987. – 38 с. / Препринт № 12-87.
17. Stefanov Yu.P. Wave dynamics of cracks and multiple contact surface interaction // Theor. and Appl. Frac. Mech. – 2000. – V. 34/2. – P. 101–108.