

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-101-109

Кхалифа М., Дуюн Т.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: kh.mona@yandex.ru*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ численных моделей, используемых при моделировании процесса резания методом конечных элементов. Приводится сравнение возможностей инженерных программ (Deform, Advantedge, ANSYS Workbench и ABAQUS) и реализуемых в них численных математических моделей. Описаны основные этапы моделирования, а также известные методы и подходы, применяемые для их реализации. Для представления процессов движения деформируемой сплошной среды анализируются подходы Лагранжа, Эйлера и Лагранжа-Эйлера. В качестве критериев разрушения материала и стружкоотделения представлены геометрические и физические критерии. Описаны преимущества использования явного и неявного методов численного интегрирования при решении дифференциального уравнения движения. Рассмотрены различные модели трения между стружкой и инструментом: Кулона-Амонтона, Зорева, Зибеля и другие. Для примера реализации моделирования процесса точения было выбрано приложение Abaqus. В результате моделирования получена информация о тепловом и напряженно-деформированном состоянии поверхностного слоя обрабатываемого изделия, инструмента и стружки. Выполнено сравнение с полученными ранее результатами с использованием приложения ANSYS Workbench. Числовые значения температур, напряжений и деформаций соответствуют традиционным представлениям о процессе резания, а также представленным в открытых источниках экспериментальным данным.

Ключевые слова: моделирование процесса резания, численные модели, применяемые программы CAE.

Введение. Метод конечных элементов приобрел большую популярность в области моделирования процессов резания металла, несмотря на сложность и многокомпонентность данной задачи [1–12]. Развитие возможностей программных средств для моделирования, усложнение и уточнение математических моделей, описывающих физические явления, сопровождающие процесс резания, позволяют получать все более точные результаты. С использованием моделирования могут быть получены важные параметры процесса резания и стружкообразования, которые невозможно или затруднительно определить прямым измерением в связи с динамическим характером протекания тепловых и силовых процессов во времени, высокими значениями температур и скоростей деформаций.

В настоящее время существует множество программных пакетов для различных видов анализа физических явлений, в том числе теплового и напряженно-деформированного состояния объектов методом конечных элементов. Эти программные пакеты можно разделить на два главных типа: универсальные программные средства, такие как ABAQUS, ANSYSAPDL, ANSYS Workbench, LS-DYNA и специализированные программные средства, такие как Deform, Advantedge.

Методология. Моделирование процесса резания в независимости от применяемого программного пакета включает ряд обязательных шагов: выбор численного подхода, выбор метода интегрирования, выбор численного метода стружкоотделения, создание модели материала, создание модели трения. Однако обозначенные общие этапы имеют особенности применения в различных программных пакетах [1].

При реализации моделирования процесса резания необходимо описать механизм движения деформируемой сплошной среды, для этого можно использовать несколько численных подходов: Лагранжа (Lagrange formulation), Эйлера (Euler formulation) и Лагранжа-Эйлера (ALE), на рис. 1 представлены их основные отличия [2, 3]. В подходе Лагранжа материальные частицы, как и узлы, меняют положение по мере деформации тела, т.е. сетка следует за материалом, поэтому движение материала легко визуализировать. Достоинством метода является постоянное обновление уравнений поведения материала, но при этом он имеет и некоторые недостатки. Поскольку элементы перемещаются с материалом заготовки, они испытывают чрезвычайно большую пластическую деформацию, превышающую размер конечных элементов, что, в свою очередь, приводит к вычислительной неустойчивости. Для решения этой проблемы требуется применять

критерии стружкоотделения или адаптивные сетки [4].

Существуют две основные категории критериев стружкоотделения: геометрические и физические. Применение геометрических критериев требует создания разделяющей линии вдоль предполагаемой траектории резания. Разделение узлов происходит, когда расстояние между крайней точкой режущей кромки инструмента и ближайшим узлом становится меньше определенной критической величины ($d_{кр}$), как показано на рис.2. Недостатком является невозможность визуализации фактического физического процесса в отличие от применения физического критерия, в котором основным механизмом стружкоотделения является заданное условие разрушения материала обрабатываемой детали (рис. 3).

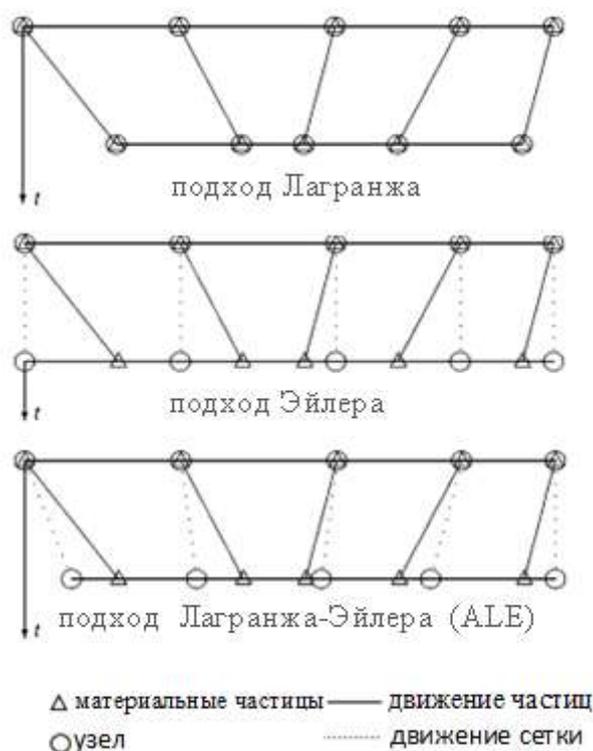


Рис. 1. Особенности описания механизмов движения деформируемой сплошной среды

В подходе Эйлера сетка фиксируется в пространстве, что позволяет материалу течь через сетку. Реализация этого метода требует меньше времени расчета, поскольку модель заготовки состоит из меньшего количества элементов и численные трудности, связанные с чрезмерно деформируемыми элементами исключены. Основным недостатком является невозможность моделировать свободные границы.

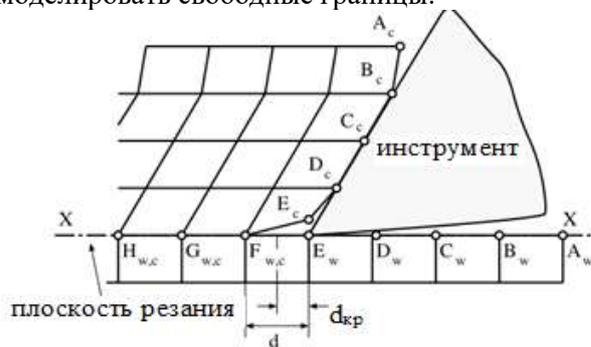


Рис. 2. Схема геометрического критерия стружкоотделения



Рис. 3. Схема физического критерия стружкоотделения

Подход Лагранжа-Эйлера (ALE) был предложен в попытке объединить преимущества обоих методов: Лагранжа и Эйлера. Процесс моделирования состоит из последовательного применения шагов Лагранжа и Эйлера как показано на рис. 4. На первом шаге (шаг Лагранжа) сетка следует за материалом, а на втором шаге (шаг Эйлера) узлы перемещаются в их первоначальные положения.

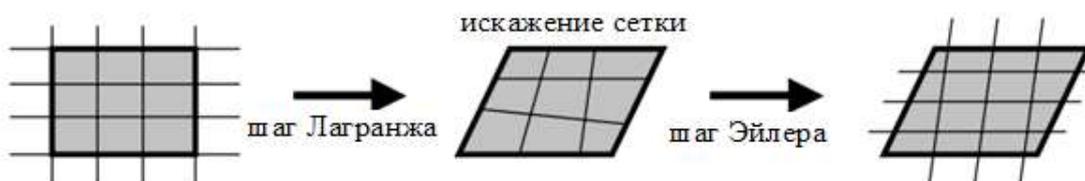


Рис. 4. Этапы реализации метода Лагранжа-Эйлера (ALE)

Для моделирования процесса стружкообразования и назначения критерия, характеризующего отделение стружки от обрабатываемой поверхности наиболее часто применяют сопряженную модель Джонсона-Кука [5]. Данная модель

позволяет учитывать кумулятивный закон накопления повреждений отдельных элементов, изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала под действием температуры и напряжений:

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\varepsilon}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \cdot \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2)$$

где A – предел текучести при медленном нагружении; B – изотропное (статическое) упрочнение, характеризующее чувствительность к деформации; $\bar{\varepsilon}$ – эквивалентная пластическая деформация; n – коэффициент, представляющий эффект упрочнения; C – коэффициент чувствительности к скорости деформации; $\dot{\varepsilon}$ – скорость пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформации при статических испытаниях; T_0, T_m – температура окружающей среды и температура плавления материала соответственно; m – показатель степени, учитывающий явление термического разупрочнения материала.

В уравнении (1) первый множитель описывает явление наклепа, второй – динамическое упрочнение, третий – явление термического разупрочнения.

Поскольку процесс резания металла является нелинейным и динамическим, его моделирование требует использования методов численного интегрирования для решения дифференциального уравнения движения. Для этого применяют два основных типа методов временной интеграции: явный и неявный [6, 7].

Явный метод используется для решения уравнений динамики и включает рекуррентные соотношения для вычисления перемещений, скоростей и ускорений на данном шаге через их значения на предшествующих шагах. Данный метод не связан с решением систем уравнений, но относительно стабилен. Для обеспечения стабильности шаг по времени обусловлен критическим временем, определяемым программой в зависимости от размера наименьшего элемента в модели и скорости звука в материале в соответствие выражению:

$$\Delta t_{crit} \leq \min(L_e/C_e), \quad (3)$$

где L_e – размер наименьшего элемента в модели, C_e – скорость распространения звуковой волны.

Неявный метод интегрирования подходит для квазистатических задач. В этом случае расчет сводится к серии решений и включает решение системы линейных уравнений методом Ньютона-Рафсона на каждом шаге. Такое интегрирование является, безусловно, устойчивым, поэтому шаг по времени может назначаться достаточно большим.

Одним из наиболее важных и сложных аспектов процессов обработки является трение

между стружкой и инструментом [8]. Модель Кулона–Амонтона является первой и наиболее простой моделью, предложенной для описания процесса трения при резании:

$$F = \mu \cdot N, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения; N – сила нормальной реакции.

Для уточнения особенностей процесса трения при резании Зоревым предложена более реалистичная модель. Основная идея заключается в том, что участок контакта стружки и инструмента разделен на две зоны: прилипания и скольжения (рис.5). Зона прилипания расположена вблизи режущей кромки инструмента и характеризуется большими значениями нормальных напряжений, поэтому напряжение трения принято равным пределу текучести на сдвиг обрабатываемого материала τ_y . В зоне скольжения нормальные напряжения существенно меньше, а напряжение трения пропорционально нормальному напряжению σ_n . На рис.6 графически представлено распределение напряжений, соответствующее следующему выражению:

$$\tau_f = \begin{cases} \tau_y, & 0 \leq l \leq l_c (\mu \sigma_n \geq \tau_y) \rightarrow stick \\ \mu \sigma_n, & l > l_c (\mu \sigma_n < \tau_y) \rightarrow slid \end{cases}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения Кулона; l_c – переходная зона.

Закон Зибеля использует константную модель сдвига, его особенностью является допущение о малом изменении напряжения сдвига и нормального напряжения вдоль передней поверхности, поэтому ими пренебрегают. Предполагается, что напряжение трения пропорционально напряжению текучести на сдвиг обрабатываемого материала $\tau_f = m \tau_y$, где τ_y – предел текучести на сдвиг, а m – коэффициент трения.

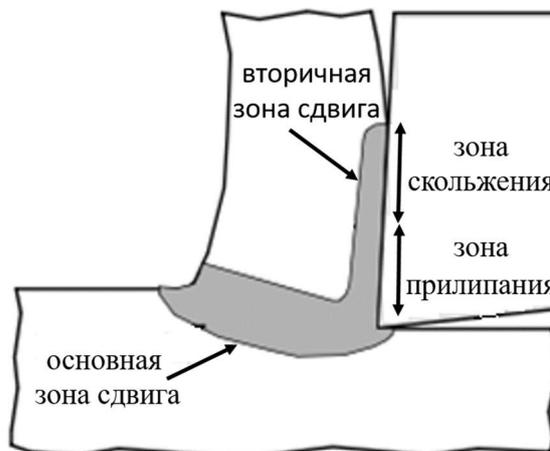


Рис. 5. Зоны сдвига и трения в процессе стружкообразования

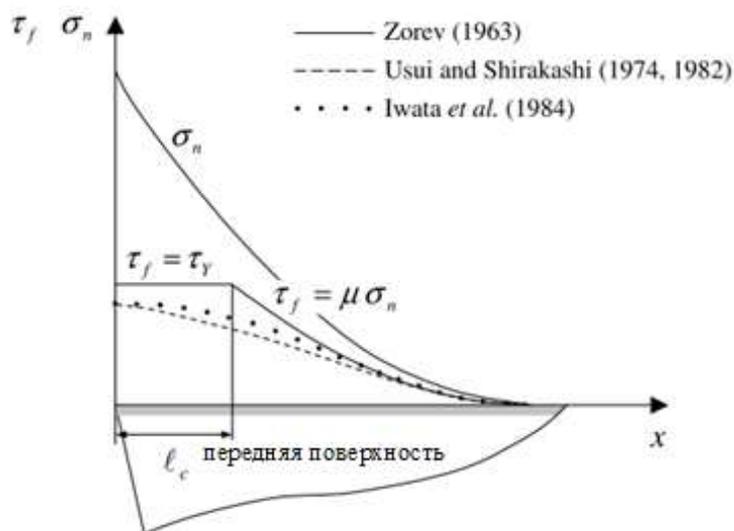


Рис. 6. Распределение напряжений трения и нормальных напряжений вдоль передней поверхности

Usui и Shirakashi разработали модель трения, используя нелинейное уравнение для выражения состояния напряжения в зоне прилипания и скольжения:

$$\tau_f = \tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu\sigma_n}{\tau_Y}\right) \right]. \quad (6)$$

Childs и коллеги предложили внести изменения в предыдущую модель следующим образом:

$$\tau_f = m\tau_Y \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu\sigma_n}{m\tau_Y}\right)^n \right]^{1/n}, \quad (7)$$

где n – постоянная, характеризующая переход от зоны прилипания к скольжению, m – постоянная, определяющая эффект смазки.

Представленные выше этапы и особенности моделирования процесса резания могут быть реализованы как в специализированных программах, таких как Deform и Advantedge, так и в универсальных, таких как Abaqus, Ansys Workbench, ANSYS APDL, LS-Dyna [4]. Главным преимуществом DEFORM и ANSYS Workbench по сравнению с другими, в частности ABAQUS, являются большие библиотеки материалов с возможностью редактирования физических свойств существующих материалов и создания новых.

Сравнение возможностей, описанных выше, для программных пакетов Abaqus, ANSYS Workbench (WB), Deform и Advantedge представлено в табл. 1 [9, 10].

Таблица 1

Сравнение возможностей программ САЕ

Особенности применения	ABAQUS	ANSYS (WB)	DEFORM	ADVANTED-GE
Численный подход	Лагранж-Эйлер (ALE)	Лагранж-Эйлер (ALE)	Лагранж	Лагранж
Метод интегрирования	явный / неявный	явный / неявный	неявный	явный
Библиотека материалов	нет	есть	есть	нет
Модель поведения материала	Джонсона-Кука	Джонсона-Кука	Джонсона-Кука	Джонсона-Кука
Модель трения	закон Кулона, закон Зибеля	закон Кулона, закон Зибеля	закон Кулона, закон Зибеля	закон Кулона
Тип решаемых задач	универсальный	универсальный	процесс резания	процесс деформации

В рамках исследования сравнительных характеристик моделирования процесса резания с использованием различных программных средств авторами было выполнено моделирование процесса точения стали 45 с использованием двух конечно-элементных пакетов: ANSYS

Workbench и Abaqus. Моделирование в пакете ANSYS Workbench реализовывалось в трехмерной постановке, а моделирование в пакете Abaqus – в двухмерной. На рис. 7, 8 соответственно представлены расчетные схемы имитационной модели для пакетов ANSYS Workbench

и Abaqus. Разработка расчетной схемы является одним из наиболее важных этапов моделирования, так как обуславливается поставленными задачами и определяет исходные допущения и граничные условия модели. Основной задачей моделирования являлось определение параметров деформационных и тепловых процессов, сопровождающих резание. Эти процессы характеризуются большими градиентами значений в небольшой активной зоне, поэтому для получения адекватных результатов моделирования необходимо использовать очень мелкую конечно-элементную сетку, в данной задаче размер сетки составлял 1×10^{-8} мм. Это требует больших вычислительных ресурсов и значительных временных затрат на реализацию процесса моделирования (время моделирования в двухмерной постановке составило около 30 минут, а в трехмерной постановке – 5 часов). Поэтому в расчетную схему включены только элементы обрабатываемого изделия и инструмента, непосредственно

участвующие в процессе формирования и отделения стружки: часть обрабатываемой поверхности (рис. 7, часть 3) и активная часть режущей кромки инструмента (рис. 7, часть 1). Условное отделение частей от цельных объектов (обрабатываемого изделия и инструмента) компенсируется граничными условиями, установленными в расчетной схеме. Аналогичная расчетная схема, как правило, в двухмерной постановке традиционно используется рядом авторов при моделировании резания [7, 8, 11]. Часть 2 расчетной схемы (рис. 7) соответствует толщине срезаемого слоя. Как известно, толщина срезаемого слоя формируется подачей инструмента, главным углом в плане резца и передним углом режущей кромки, а ширина срезаемого слоя – глубиной резания, главным углом в плане резца и задним углом режущей кромки. Особенностью расчетной схемы, реализуемой в ANSYS Workbench (рис.7), является учет как толщины, так и ширины срезаемого слоя, так как задача решается в трехмерной постановке.

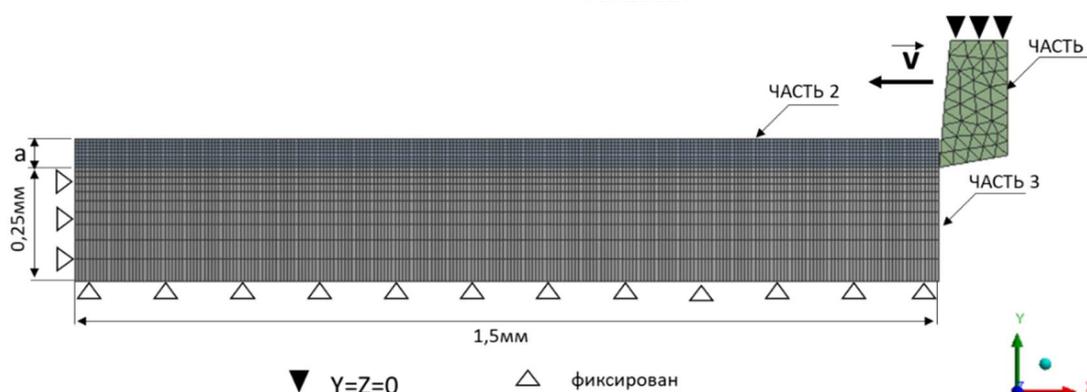


Рис. 7. Расчетная схема имитационной модели процесса резания в пакете ANSYS Workbench

Ширина среза измеряется в расчетной схеме по координате Z . Расчетная схема, применяемая в Abaqus (рис. 8), учитывает только толщину среза, так как реализована в двухмерной постановке. Толщина среза в обоих случаях одинакова $a=0,1$ мм, геометрические параметры режущей кромки инструмента заданы передним углом $\gamma=5^\circ$ и задним углом $\alpha=10^\circ$. Для имитации скорости резания при моделировании резец перемещается относительно обрабатываемой поверхности со скоростью $v=5$ м/с (300 м/мин). Инструментальный материал – твердый сплав. Описание механизма движения деформируемой сплошной среды выполнялось с использованием подхода Лагранжа и явного метода интегрирования. Условия трения приняты на основе модели Кулона-Амонтона, коэффициент кулоновского трения $\mu=0,22$. Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, а

также параметры модели Джонсона-Кука представлены в работе [12].

Значения результатов моделирования оценивались следующими параметрами: уровень напряженного состояния – эквивалентным напряжением Мизеса (рис. 9), степень деформации обрабатываемого материала и инструмента – пластическими деформациями (рис.10), тепловое состояние – тепловым полем в заготовке (рис. 11). В качестве действующего теплового потока учитывался только тепловой поток от деформации и разрушения материала. Тепловой поток от трения инструмента с обрабатываемым материалом по задней поверхности и со стружкой по передней поверхностью не учитывался. Максимальные значения деформаций и напряжений концентрируются в так называемой условной плоскости сдвига, что соответствует традиционным представлениям о резании. Максимальную температуру имеет стружка и зона деформации.

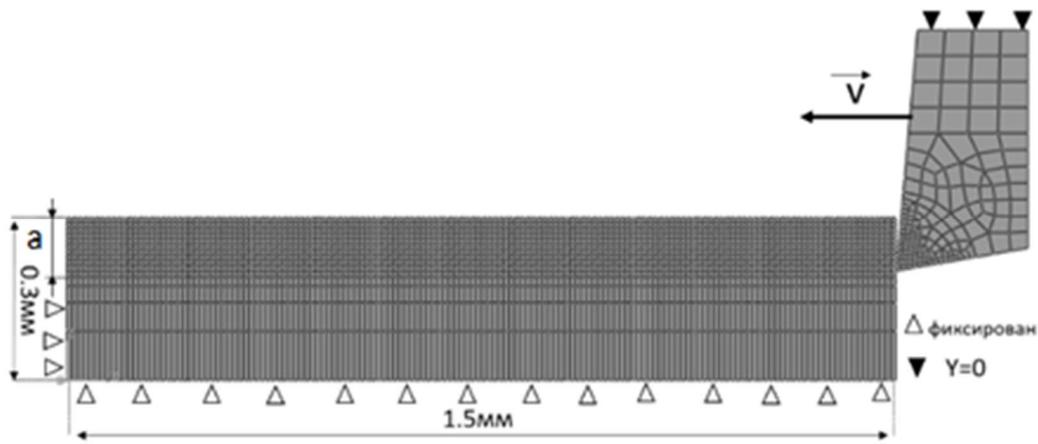


Рис. 8. Расчетная схема имитационной модели процесса резания в пакете Abaqus

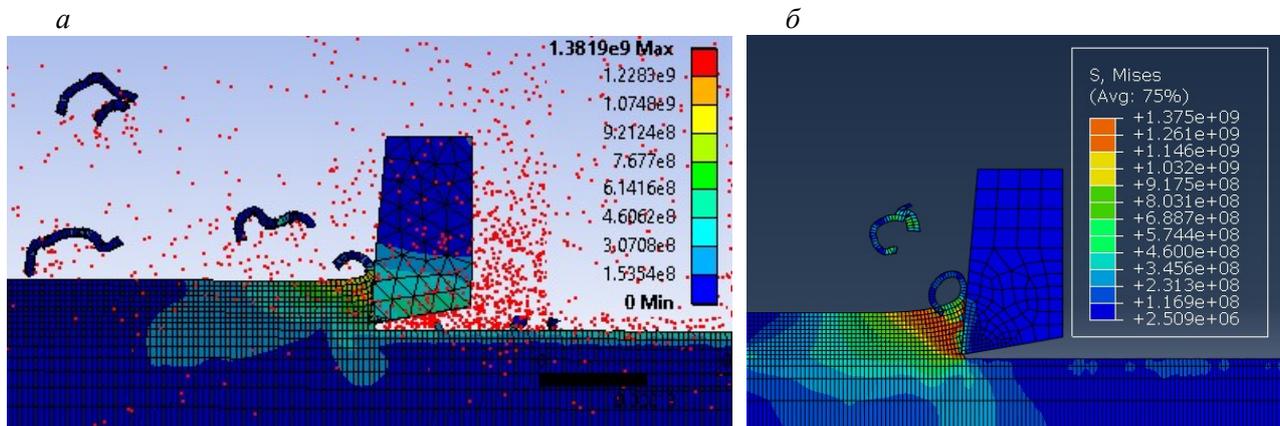


Рис. 9. Эквивалентное напряжение Мизеса: *а* – ANSYS Workbench; *б* – Abaqus

В табл. 2 представлено сравнение значений, полученных при моделировании в ANSYS Workbench и Abaqus. Анализируя табл. 2, можно заметить, что численные результаты показали хорошую сходимость при одинаковых условиях резания, что свидетельствует о корректности применяемой методики моделирования. Одинаковые

результаты несмотря на то, что задача в ANSYS Workbench решалась в трехмерной постановке, а в Abaqus – в двухмерной, можно объяснить тем, что представленные результаты характеризуют удельную силовую и тепловую нагрузку на режущую кромку инструмента и не зависят от ширины среза при одинаковой толщине.

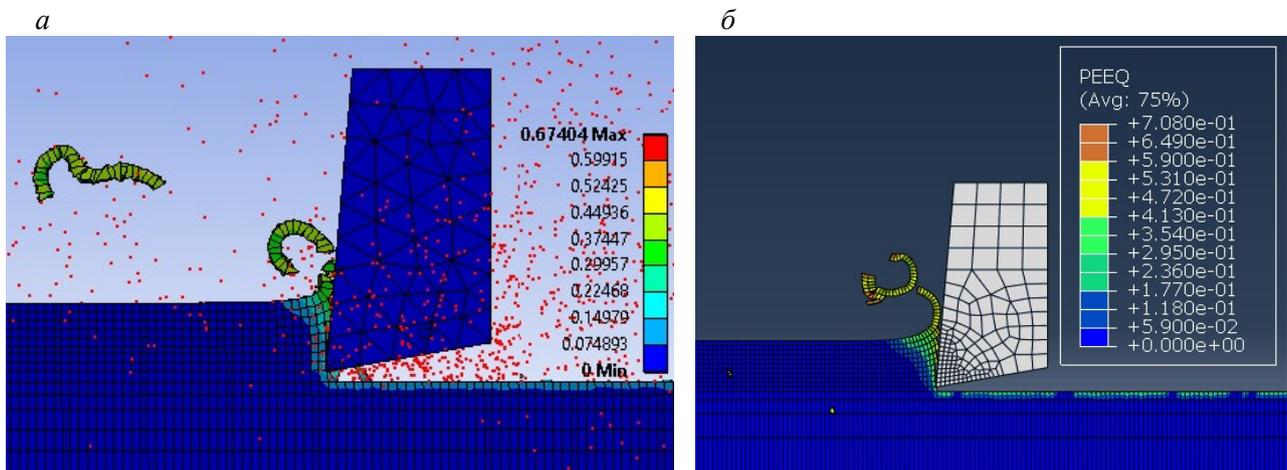


Рис. 10. Значения пластической деформации: *а* – ANSYS Workbench; *б* – Abaqus

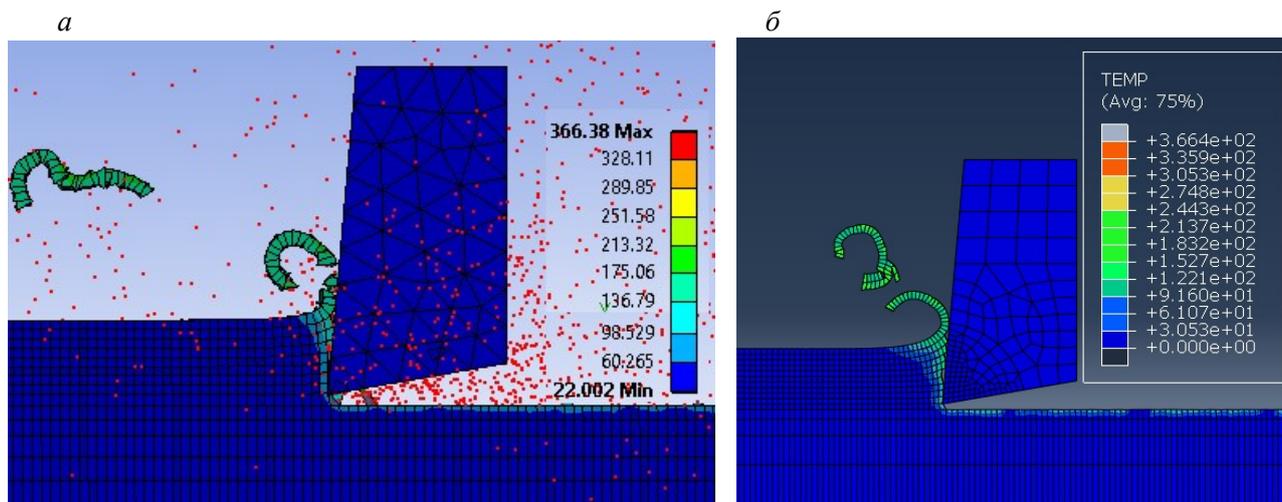


Рис. 11. Тепловое поле стружки и заготовки: а – ANSYS Workbench; б – Abaqus

Таблица 2
Сравнение полученных значений
при моделировании в ANSYS Workbench и
Abaqus

Максимальное значение параметра	ANSYS Wb	Abaqus
Напряжение Мизеса (Па)	1,38e9	1,37e9
Пластическая деформация	0,67	0,7
Температура (°C)	366	366

Несмотря на схожие результаты, реализация моделирования в отдельных программных пакетах имеет свои особенности. Так для моделирования взаимосвязанных термомеханических процессов, сопровождающих резание, в пакете Abaqus есть специальный конечный элемент CPE4RT, позволяющий решать многокомпонентную задачу одним решателем. Такой элемент, например, можно применить для учета теплового потока от трения инструмента со стружкой по передней поверхности и обрабатываемой поверхностью – по задней. Это предполагается выполнить в рамках дальнейшего усложнения представленной модели. В пакете ANSYS Workbench такой конечный элемент отсутствует, а многокомпонентная задача решается несколькими решателями последовательно или в прямой связи. Последовательное решение предполагает экспорт результатов решения одного решателя в качестве исходных данных в другой решатель. Проблемой является возможность экспорта данных только от теплового расчетного модуля в модуль расчета напряженно-деформированного состояния. Таким образом, нет возможности экспортировать данные напряженно-деформированного

состояния в тепловую задачу, то есть учесть тепловой поток от трения. Реализация прямой связи решателей требует разработки и применения специальных программных связующих блоков, и, как правило, не доступна обычному пользователю.

Выводы. Для получения адекватных результатов моделирования процесса резания с применением программных средств необходимо осуществить ряд обязательных этапов: выбор численного подхода для описания движения деформируемой сплошной среды, выбор численного алгоритма стружкоотделения, выбор метода интегрирования, создание модели материала, создание модели трения. При этом различные программные средства имеют определенные особенности в реализации отдельных этапов. Моделирование точения стали 45 в пакетах ANSYS Workbench и Abaqus при одинаковых технологических параметрах, а также при сходных программных условиях реализации моделирования показывают хорошую сходимость, в том числе с известными экспериментальными данными, что говорит о корректности принятой методики. Для сокращения времени моделирования возможно решение задачи в двухмерной постановке без снижения точности решения. Моделирование процесса резания в пакете Abaqus, по мнению авторов, имеет ряд преимуществ, позволяющих создавать более сложные модели и решать многокомпонентные задачи, учитывать одновременно протекающие термомеханические процессы, например, тепловой поток не только от деформации и разрушения материала, но и от контактного трения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунов И.В., Ефременков И.В., Леонтьев В.Л., Гисметулин А.Р. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ системах // Известия Самарского научного центра. 2013. № 4. С.846–453.
2. Корендяев Г.К. О конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 1) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 2. С. 14–24.
3. Outeiro J., Umbrello D., Saoubi R., Jawahir S. Evaluation of present numerical models for predicting metal cutting performance and residual stresses // Machining Science and Technology. 2015. С. 183–216.
4. Vaz Jr. Mi., Owen D.R., Kalthori V., Lundblad M.L. Modelling and Simulation of Machining Processes // Springer. 2007. С. 173–204.
5. Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. Т. 56. № 2. 2015. С. 82–93.
6. Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modeling. India: Изд-во researchgate, 2008. 70 p.
7. Priyadarshini A, Surjya K., Samantaray. Finite Element Modeling of Chip Formation in Orthogonal Machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2016. С. 101–144.
8. Silva V.M. Friction Modeling In Finite Element Simulation of Orthogonal Cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017. Pp. 1–9.
9. Rodríguez J.M., Carbonell J.M., Jonsén P. Numerical Methods for the Modelling of Chip Formation // Computational Methods in Engineering. 2018. С. 1–26.
10. Криворучку Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов. М.: Изд-во университетская книга, 2012. 434 с.
11. Wang K. Calibration of the Johnson-cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. Canada, 2016. 103 p.
12. Кхалифа М., Дуюн Т.А. моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечно элементного пакета ANSYS Workbench // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 12. С. 121–127.

Информация об авторах

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения». E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кхалифа Мона, аспирант кафедры «Технологии машиностроения». E-mail: kh.mona@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 04.06.2020 г.

© Кхалифа М., Дуюн Т.А., 2020

***Khalifa M., Dujun T.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: kh.mona@yandex.ru*

CLASSIFICATION AND ZONING OF RIVERINE TERRITORIES OF SMALL TOWNS ON THE EXAMPLE OF THE BELGOROD REGION

Abstract. The paper presents an analytical study for comparing different numerical methods used for the modeling of cutting process using finite element method. The aims of this study is to compare capabilities of FE software package (Deform, AdvantEdge, ANSYS Workbench and ABAQUS). The main stages of modeling are discussed, as well as well-known methods and approaches used for their implementation. Main formulations for description of motion of deformable materials are analyzed to Lagrangian approach, Eulerian approach, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) approach. Numerical techniques to model chip separation are grouped as geometrical and physical. In this paper two strategies for time integration, implicit and explicit schemes are reviewed. Various models of friction between the chip and the tool are discussed: Amonton-Coulomb's Law, Prandtl's Law and Zorev. In this work, modeling and simulation of cutting process is carried out by FEM software ABAQUS. As a result of modeling, the stress and strain fields for both the workpiece and

the tool are presented, as well as the thermal field of the workpiece and the chip. The numerical results obtained are compared with the results have been carried out previously using software ANSYS Workbench. The numerical values of temperatures, stresses and deformations correspond to traditional concepts of the cutting process, as well as experimental data presented in open sources.

Keywords: modeling of the cutting process, numerical methods, FE software packages.

REFERENCES

1. Gorbunov I.V., Efremkov I.V., Leontiev V.L., Gismetulin A.R. features of modeling of mechanical machining processes in CAE systems [Osobnosti modelirovaniya protsessov mekhanicheskoy obrabotki v CAE sistemakh]. Bulletin of the Samara Scientific Center. 2013. No. 4. Pp.846–453. (rus)
2. Korendyasev G.K. Finite element modeling of the metal cutting process (part 1) [O konechno-elementnom modelirovanii protsessa obrabotki metallov rezaniyem (chast 1)]. Bulletin of scientific and technical development. 2015. No. 2. Pp. 14–24. (rus)
3. Outeiro J., Umbrello D., Saoubi R., Jawahir S. Evaluation of present numerical models for predicting metal cutting performance and residual stresses. Machining Science and Technology. 2015. Pp. 183–216.
4. Vazjr. M., Owen D.R., Kalhori V., Lundblad M.L. Modelling and Simulation of Machining Processes. Arch Comput Methods Eng. 2007. No. 1. Pp. 173–204.
5. Buzyurkin A.E., Gladky I.L., Kraus E.I. Determination of parameters of the Johnson-Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys [Opredeleniye parametrov modeli Dzhonsona-Kuka dlya opisaniya protsessov deformirovaniyai razrusheniya titanovykh splavov]. Applied Mechanics and Technical Physics. T. 56 .2015. No. 2. Pp. 82–93. (rus)
6. Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modeling. Portugal: Springer, 2008. 70 p.
7. Priyadarshini A., Surjya K., Samantaray A.K. Finite Element Modeling of Chip Formation in Orthogonal Machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2016. Pp. 101–144
8. Silva V.M. Friction Modeling In Finite Element Simulation of Orthogonal Cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017. Pp. 1–9.
9. Rodriguez J.M., Carbonell J.M., Jonsen P. Numerical Methods for the Modelling of Chip Formation. Computational Methods in Engineering. 2018. Pp. 1–26.
10. Krivoruchka D.V., Pledge V.A. Modeling of cutting processes using the finite element method [Modelirovaniye protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov]. Moscow: Publishing University book. 2012. 434 p. (rus)
11. Wang K. Calibration of the Johnson-cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. Canada, 2016. 103 p.
12. Khalifa M., Dujun T.A. Finite element modeling of the cutting process during machining of structural steel using ANSYS Workbench [Modelirovaniye protsessa rezaniya konstruktsionnoy stali s ispol'zovaniyem konechno-elementnogo paketa ANSYS Workbench]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 12. Pp. 121–127. (rus)

Information about the authors

Duyun, Tatyana A. DSc, Professor. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Khalifa, M. Postgraduate student. E-mail: kh.mona@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 04.06.2020

Для цитирования:

Кхалифа М., Дуюн Т.А. Сравнительный анализ методик моделирования процесса резания с использованием программных средств // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 8. С. 101–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-101-109

For citation:

Khalifa M, Dujun T.A. Classification and zoning of riverine territories of small towns on the example of the Belgorod region. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 8. Pp. 101–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-101-109