

УДК 669:621.965.01:519.876.5

*к.т.н. Боровик П. В., Греновецкая Т. И.
(ДонДТУ, г. Лисичанск, Украина, borovikpv@mail.ru)*

ОСОБЕННОСТИ ДВУХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА РЕЗКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ НОЖАМИ

На основе анализа и обобщения опыта разработки двухмерных конечно-элементных математических моделей процесса резки параллельными ножами, отмечены особенности, оказывающие существенное влияние на результаты моделирования. Обоснован выбор формулировки метода конечных элементов применительно к данной задаче. Предложен способ построения исходной сетки, позволяющий минимизировать число элементов и поддерживать структурированность сетки в ходе симуляции. Отмечена необходимость наложения дополнительных ограничений на узлы сетки. Указан тип конечных элементов для данного класса задач. Приведен пример сетки перед началом разрушения применительно к моделированию процесса горячей резки параллельными ножами.

Ключевые слова: *резка параллельными ножами, моделирование, метод конечных элементов, конечно-элементная сетка.*

Введение. Развитие теоретических основ механики и реологии сплошных сред, используемых при математическом моделировании методом конечных элементов (МКЭ), в сочетании, с возможностями современной вычислительной техники позволяет, в настоящее время, решать широкий спектр задач в области процессов обработки металлов давлением (ОМД) [1-2].

Очевидно, что при проведении экспериментальных исследований процессов разделения металла на ножницах информации о поведении материала собственно в зоне реза будет крайне ограниченной. Для ее расширения может потребоваться целый ряд финансовых и организационных затрат. В то же время, смещение акцентов в сторону теоретических исследований, базирующихся на МКЭ способно в максимально полной степени предоставить информацию о физических процессах, протекающих в металле при резке. Это, несомненно, будет способствовать расширению представления о процессах резки и позволит повысить эффективность принятия технологических и проектно-конструкторских решений в вопросах резки металла на ножницах.

Состояние вопроса. Для математического моделирования при решении одной и той же задачи могут быть использованы различные методы. Однако в настоящее

время, МКЭ стал стандартом при решении сложных задач механики твердого деформируемого тела, поведение которого характеризуется зависимостью свойств от пути деформирования и истории деформирования материала.

Из теоретических основ механики сплошных сред известно [1, 2], что существуют различные представления движения частиц среды в зависимости от выбора системы отсчета. В настоящее время для описания течения металла при пластической деформации уравнениями механики сплошных сред используются два равноправных метода представления закона деформирования в декартовых координатах – метод Лагранжа и метод Эйлера.

Аналогично данным представлениям в МКЭ [2, 3] существуют формулировки Лагранжа и Эйлера, пригодные для решения определенных классов задач. Однако расширение круга задач, решаемых МКЭ, выявило ряд недостатков данных формулировок, в частности в задачах моделирующих большие пластические деформации, что привело к появлению формулировки Лагранжа-Эйлера.

© Боровик П. В., 2017

© Греновецкая Т. И., 2017

Применительно к процессам ОМД, сопровождающимся большими пластическими деформациями важным является правильный выбор формулировки МКЭ, поскольку от этого зависит возможность максимально корректного и точного решения поставленной задачи без перестроения сетки по причине ее сильного искажения (рис. 1).

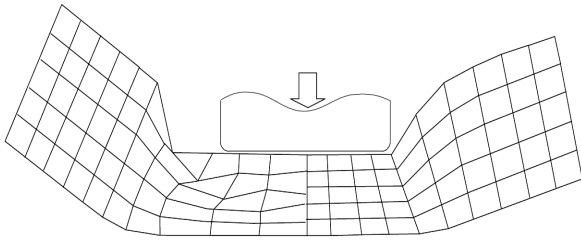


Рисунок 1 – Моделирование процесса осадки заготовки: левая часть – стандартная формулировка Лагранжа; правая часть – формулировка Лагранжа-Эйлера [2]

Кроме того, в подобных задачах, также может потребоваться, чтобы структура исходной сетки учитывала особенности моделируемого процесса и поддерживала их на протяжении всей симуляции МКЭ [2].

Очевидно, что моделирование процессов резки, кроме прочего, усложнено еще и необходимостью структурирования сетки, с учетом полного разделения металла.

Постановка задачи. Цель данной работы заключается в необходимости разработки рекомендаций по построению, структурированию и контролю конечно-элементной сетки при двухмерном моделировании процесса резки параллельными ножами.

Изложение материала и результатов работы. Опираясь на опыт моделирования [4-6] МКЭ в программном комплексе Abaqus процесса резки параллельными ножами можно утверждать, что при моделировании использовать формулировку Эйлера нецелесообразно. Стандартную формулировку Лагранжа также следует исключить, поскольку ее применение достаточно быстро приводит к искажению

сетки и, как следствие, к невозможности продолжить вычисления.

Применение модифицированной формулировки Лагранжа с перестроением сетки, несомненно, позволит производить вычисления более длительное время, но перестроение сетки требует больших затрат машинного времени, а перенос информации о переменных состояния ведет к увеличению погрешности вычислений.

Таким образом, наиболее предпочтительной в данном случае является формулировка Лагранжа-Эйлера, поскольку она позволяет подстраивать (адаптировать) сетку в процессе вычислений.

Однако правильно выбранная формулировка это, хотя и очень важный, но только первый шаг. Гораздо более ответственным является вопрос выбора типа конечных элементов и исходное структурирование сетки с последующим наложением дополнительных ограничений, способных не только поддерживать структуру сетки, но и адекватное поведение свободных и контактирующих с инструментом поверхностей.

При построении сходной сетки применительно к процессу резки параллельными ножами необходимо учитывать ряд особенностей моделируемого процесса.

Так, при построении сетки из элементов равного размера по всей моделируемой площади, можно получить ситуацию, когда размер элементов будет достаточно большим, что не позволит сетке корректно перестраиваться в вершинах элементов (учитывая, что профиль ножа имеет прямоугольную форму). При этом может возникнуть ситуация, когда сторона элемента будет пересекать инструмент, даже при условии некоторого округления его вершины.

Сгущение сетки, за счет уменьшения размеров конечных элементов может способствовать устранению данной ситуации, однако (учитывая, что радиус округления в вершине ножа должен быть достаточно небольшим) это приведет к существенно-

му увеличению числа элементов и, как следствие, многократному возрастанию числа уравнений и времени вычислений. Кроме того, увеличение числа уравнений, может потребовать применения двойной точности вычислений, чтобы минимизировать машинную (накапливаемую при расчетах) погрешность, а, следовательно, еще дополнительно увеличит время расчета. При этом нет никаких гарантий, что процесс не будет прекращен, в силу невыполнения дополнительных ограничений накладываемых на перестроение сетки.

Исходя из выше сказанного, следует, что при построении сетки первоначальную область целесообразно разбить на подобласти с различным размером конечных элементов. При этом подобласть в зоне собственно реза, где будут иметь место большие пластические деформации с последующим разрушением, должна содержать более мелкие по размеру элементы. В других подобластях, по мере удаления от зоны реза размер элементов может быть существенно (в несколько раз) больше, поскольку степень пластической деформации там будет значительно ниже, а может и вообще иметь только упругий характер.

На рисунке 2 в качестве примера представлена схема разбиения моделируемой области на подобласти, которая была использована при разработке 2D моделей процесса резки параллельными ножами.

При такой схеме разбиения подобласти I и XIII будут иметь крупную сетку, кото-

рая описывает зоны соответственно основного материала и отрезаемой кромки. Подобласти II-V и IX-XII являются переходными зонами между основным материалом и зоной собственно реза, а также между зоной собственно реза и отрезаемой кромки. Данные подобласти необходимы для сгущения (уменьшения размеров элементов) сетки по высоте в зоне реза. Подобласти VI-VIII моделируют собственно зону реза и здесь дополнительно сгущают сетку по ширине, а также создается определенный угол ее наклона к вершинам ножей.

Кроме того, необходимы дополнительные разбиения верхней границы подобласти VI и нижней подобласти VIII, находящихся в зоне собственно реза. Это позволит удерживать требуемое сгущение сетки в непосредственной близости к вершине ножа и обеспечит успешное перестроение сетки по контуру режущего инструмента, а также корректное поведение свободных и контактирующих поверхностей.

Однако простого разбиения на подобласти будет недостаточно, поскольку конфигурация исходной сетки (рис. 3, а), без дополнительных ограничений, может существенно видоизмениться (рис. 3, б и 3, в), т.к. предварительно выбранная формулировка Лагранжа-Эйлера подразумевает регулярную (в процессе вычисления) адаптацию сетки.

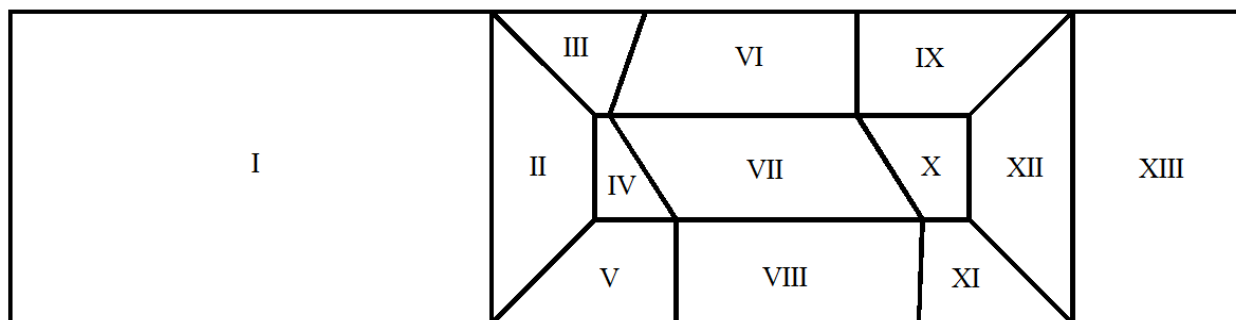


Рисунок 2 – Схема разбиения моделируемой области на подобласти при разработке двухмерных моделей процесса резки параллельными ножами

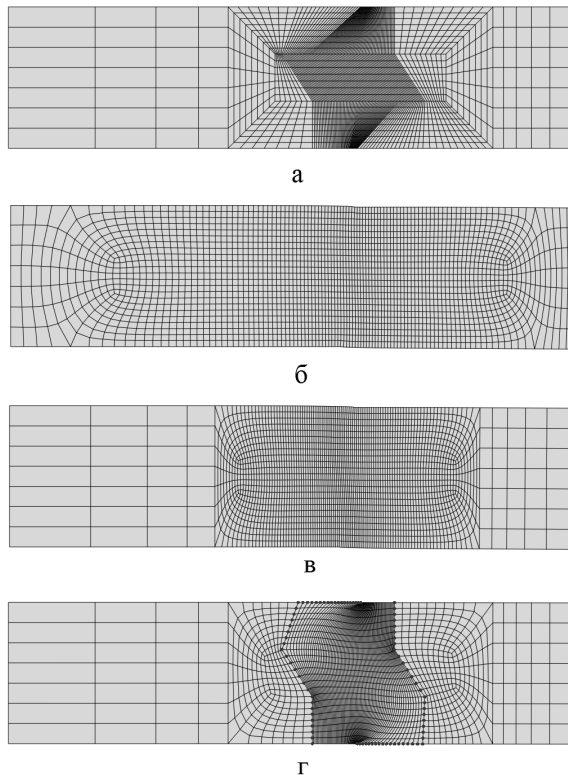


Рисунок 3 – Конфигурации сетки исходной (а) и после адаптации при использовании формулировки Лагранжа-Эйлера для всех подобластей (б), для подобластей II-XII без дополнительных ограничений (в) и с ограничениями (г) поведения узлов (•) в формулировке Лагранжа

Для исправления такой ситуации можно предложить следующие варианты действий:

1) для всей моделируемой области использовать формулировку Лагранжа-Эйлера, а на границах подобластей установить для узлов поведение в формулировке Лагранжа;

2) использовать формулировку Лагранжа-Эйлера только для подобластей, в которых расположена зона собственно реза, а для всех остальных – формулировку Лагранжа.

Второй вариант является более предпочтительным по ряду причин. Во-первых, перестраивать сетку в областях удаленных от зоны реза нет необходимости, а процесс

перестроения требует дополнительного времени. Во-вторых, поведение узлов, расположенных на свободных поверхностях, целесообразно представлять в формулировке Лагранжа, что способствует более корректному описанию поведения свободных поверхностей (рис. 3, г).

В дополнение необходимо отметить, что геометрия разбиения (координаты узловых точек) может потребовать перестроения при изменении настройки ножниц (боковой зазор, геометрия режущего инструмента и т.п.) или условий контактного взаимодействия (например, изменился коэффициент трения). Кроме того, особенно при моделировании процессов горячей резки, может потребоваться изменить количество разбиений каждого из участков, дабы удержать необходимый угол наклона граней элементов по отношению к линии среза до момента начала разрушения. В противном случае можно получить достаточно неожиданные эффекты, начиная от раннего (при относительно небольших внедрениях) среза, до искажения сетки и невозможности продолжения вычислений.

Для построения сетки целесообразно использовать изопараметрические четырехугольные линейные элементы с редуцированной схемой интегрирования, которые имеют свойства сплошной деформируемой среды в условиях плоской деформации. В ряде случаев, когда необходимо учесть влияние тепла, выделяющегося при деформировании и разрушении материала, можно использовать такие же элементы, но имеющие расширенные возможности для решения совместной деформационно-температурной задачи.

В качестве примера эффективности рассмотренных выше рекомендаций на рисунку 4 приведена структура сетки при моделировании процесса горячей резки параллельными ножами заготовки из стали ШХ10. Как можно видеть из представленного рисунка, вплоть до момента начала разрушения (скола отрезаемой кромки),

сетка продолжает оставаться структурированной, повторяя контур режущих инструментов. Достичь такого результата, без соблюдения хотя бы одной из предложенных рекомендаций будет практически невозможно.

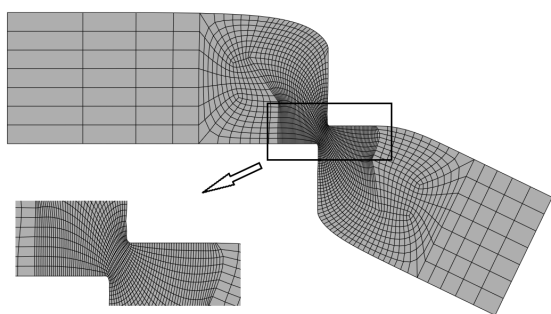


Рисунок 4 – Конфигурации сетки перед началом разрушения при моделировании процесса резки параллельными ножами заготовки из стали ШХ10 толщиной 25 мм со скоростью резки 300 мм/с при температуре 1090°C

Выводы. Двухмерное моделирование МКЭ процесса резки параллельными ножами представляется достаточно сложной задачей, требующей многостороннего анализа и взвешенного подхода при принятии решений по выбору эффективных инструментов для достижения положительного результата. В связи с чем, обобщая полу-

ченные результаты, можно отметить следующее:

- наиболее предпочтительной формулировкой для такого класса задач является формулировка Лагранжа-Эйлера, поскольку она позволяет подстраивать (адаптировать) сетку в процессе вычислений;
 - при построении сетки, моделируемую область следует делить на подобласти, что позволит управлять размерами элементов и структурировать сетку в соответствии с особенностями процесса;
 - формулировку Лагранжа-Эйлера целесообразно использовать только для подобластей, в которых расположена зона собственно реза, а для всех остальных – формулировку Лагранжа;
 - в зоне собственно реза поведение узлов, расположенных на свободных поверхностях, целесообразно представлять в формулировке Лагранжа для более корректного описания поведения свободных поверхностей;
 - при построении сетки следует использовать изопараметрические четырехугольные линейные элементы с редуцированной схемой интегрирования.
- Результаты работы могут быть использованы при разработке двухмерных конечно-элементных математических моделей процесса резки параллельными ножами.

Библиографический список

1. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 542 с.
2. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.
3. Wisselink H. H. *Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis* / H. H. Wisselink. – Twente, The Netherlands, 2000.
4. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик // Сборник научных трудов / Вестник национального технического университета ХПИ. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76-80.
5. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: навч. посіб. / П. В. Боровік. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с.
6. Боровик П.В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П.В. Боровик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 2 (287). – С.25-29.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. ДонГТУ Семирягиным С. В.,
д.т.н., проф. ДГМА Марковым О. Е.

Статья поступила в редакцию 26.12.2016

к.т.н. Боровік П. В., Греновецька Т. І. (ДонДТУ, м. Лисичанськ, Україна, borovikpv@mail.ru)
**ОСОБЛИВОСТІ ДВОВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ
СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМИ НОЖАМИ**

На основі аналізу та узагальнення досвіду розробки двовимірних скінченно-елементних математичних моделей процесу різання паралельними ножами, відзначені особливості, що істотно впливають на результати моделювання. Обґрунтований вибір формулювання методу скінченних елементів стосовно до даної задачі. Запропоновано спосіб побудови вихідної сітки, що дозволяє мінімізувати число елементів і підтримувати структурованість сітки в ході симуляції. Відзначена необхідність накладення додаткових обмежень на вузли сітки. Зазначений тип скінченних елементів для даного класу задач. Наведено приклад сітки перед початком руйнування стосовно до моделювання процесу гарячого різання паралельними ножами.

Ключові слова: різання паралельними ножами, моделювання, метод скінченних елементів, скінченно-елементна сітка.

PhD (Engineering) Borovik P. V., Hrenovetska T. I. (DonSTU, Lisichansk, Ukraine, borovikpv@mail.ru)

PECULIARITIES OF TWO-DIMENTIONAL MODELING OF SHEARING PARALLEL KNIFES PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

On the basis of analysis and generalization of experience in the development of two-dimensional finite-element mathematical models of parallel knives shearing process, marked by features which have a significant impact on the simulation results. The choice of formulation of the finite element method applied to this problem. A method for constructing the initial mesh, which minimizes the number of elements and maintain structured mesh during the simulation. The need to impose additional restrictions on the mesh nodes. Specify the type of finite element for this class of problems. An example of the mesh before the start of the fracture in relation to the modeling of hot shearing knives parallel process.

Keywords: parallel shearing knives, modeling, finite element method, finite element mesh.