

*Ст. преп. Боровик П.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗКИ МЕТАЛЛА НА ДИСКОВЫХ НОЖНИЦАХ

Приведені результати розвитку методів чисельного моделювання, а також аспекти, підходи і проблеми чисельної реалізації процесу різання металу на дискових ножницях методом кінцевих елементів.

Введение. До недавнего времени в основу теоретических исследований технологий и оборудования процессов резки металла на дисковых ножницах были положены инженерные математические модели и методы статистического анализа. Однако на сегодняшний день, благодаря возрастающим возможностям современной вычислительной техники, успешно развиваются подходы теоретических исследований, базирующиеся на разработке численных математических моделей, в основу которых положены методы теории упругости и пластичности, а также вопросы механики разрушения.

Учитывая, что экспериментальные исследования процессов резки в промышленных условиях сопряжены с целым рядом финансовых и организационных затрат, очевидной является целесообразность смещения акцентов исследований в сторону теоретических исследований, базирующихся на использовании возможностей современной вычислительной техники и способных в максимально полной степени отображать реальные физические процессы, протекающие в металле при его резке.

Состояние вопроса. Стремительный рост возможностей современных вычислительных средств, послужил основой для развития численных математических моделей процессов обработки металлов давлением вообще и процессов резки металлов на ножницах в частности. Исходя из постановки решаемых задач и используемых структур, данные математические модели могут быть подразделены на двухмерные и трехмерные.

Априори, наиболее строгими по постановке являются трехмерные математические модели, основанные на использовании вариационных методов [1,2], а также методов конечных [2,3] или граничных [2,4] элементов. В стадии развития находятся метод конечных объемов [5], бес-

сеточный метод [6] и метод нейронных сетей [7]. Сопоставительный анализ данных методов выполнен в работе [8].

Рассмотренные выше методы также обеспечивают возможность двухмерного математического моделирования. Дополнительно, с точки зрения подходов в их двухмерной постановке, следует отнести метод полей линий скольжения [9]. Структура данных методов позволяет в той или иной степени учесть двухмерный характер механизмов формирования напряжений и деформаций. Вместе с тем их использование делает необходимым и одновременное принятие ряда существенных допущений, связанных с упрощением геометрических форм очага деформации, а также с усреднением механических свойств и количественных оценок условий контактного трения. В соответствии с этим, в двухмерной постановке, метод полей линий скольжения и его производные получили наибольшее распространение применительно к анализу процессов резки параллельными ножами. Полученные в работе [9] поля характеристик в физической плоскости годографа дают возможность исследовать условия деформации металла при резании сдвигом, определить напряженно-деформированное и кинематическое состояния в очаге деформации, силовые параметры процесса в разные периоды, дать оценку влияния различных факторов на процесс резания, использования запаса пластичности и начала «отрыва», определить требования к оборудованию. Однако данный подход не позволяет получать результаты с достаточно высокой степенью достоверности для случая резки дисковыми ножами, поскольку более адекватной данному процессу является трехмерная реализация.

Вместе с тем, учитывая итерационный подход к решению задач формообразования в целом и процесса резки в частности, каждая численная реализация является достаточно трудоемкой и требует больших затрат машинного времени [10,11]. Данный факт затрудняет использование трехмерных методов анализа применительно к решению многовариантных задач обработки давлением, связанных с необходимостью организации итерационных процедур, поиском оптимальных решений и так далее.

Учитывая необходимость рационального сочетания трудоемкости выполняемых исследований, а также объемов и степени достоверности предоставляемых результатов, математическое моделирование напряженно-деформированного и кинематического состояния металла при реализации различных технологических схем процессов резки металла на ножницах предпочтительнее осуществлять на основе численного решения методом конечных элементов [11].

Постановка задачи. Целью данной работы является изучение и анализ аспектов, подходов и проблем численной реализации процесса резки металла на дисковых ножницах методом конечных элементов.

Суть и содержание работы. В основе построения моделей процесса резания на ножницах лежат уравнения равновесия, которые должны выполняться с учетом граничных условий, в том числе контакта с инструментом и соотношений, учитывающих свойства и поведение разрезаемого материала.

Поведение материала в процессе деформации описывается известными законами и соотношениями механики сплошной среды в целом и теории пластического течения в частности [2,11,12].

В качестве уравнения равновесия, с точки зрения теории пластического течения, применяют следующий вариационный принцип:

$$\int_V \sigma_{ij} \cdot \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV = \int_S F_i \cdot \delta v_i dS \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений;

$\delta \dot{\varepsilon}_{ij}$ – тензор приращения скоростей деформаций;

dV – элементарный объем;

F_i – вектор внешних сил, заданный на поверхности S ;

δv_i – вектор приращения скоростей перемещений;

dS – элемент площади поверхности тела.

Результаты операции резки зависят от формы инструментов и их движения. Контактная модель должна удовлетворять следующим математическим условиям [11]:

$$\begin{aligned} g &\geq 0 \\ \tau_N &\leq 0, \\ \tau_N \cdot g &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где g – величина зазора между инструментом и материалом;

τ_N – нормальное контактное напряжение.

Соотношения (2) констатируют, что произведение нормального контактного напряжения τ_N и зазора g , по нормали между листом и инструментом, всегда равно нулю. В случае контакта между телами величина зазора $g = 0$, а контактное напряжение $\tau_N < 0$. Когда же тела не контактируют $g > 0$, а $\tau_N = 0$.

Контактная модель базируется на аппроксимации контактного слоя, в котором для исключения проникновения материала в инструмент используется метод штрафов. В этом методе штраф представляется как контактная жесткость, способная учитывать деформацию инст-

румента при контакте с материалом, однако четкие рекомендации относительно величины штрафа практически отсутствуют.

Трение моделируется в форме, подобной поведению упруго-пластического материала. Предполагается, что имеется обратимая (упругая) часть, где тела «склеиваются» друг с другом, и необратимая (пластическая) часть, в которой тела скользят друг относительно друга. Сдвигающее напряжение, которое в зоне контакта изменяется от «склеивания» до скольжения, определяется нормальным контактным напряжением τ_N и коэффициентом трения Кулона μ , при этом величина этого коэффициента, как известно, колеблется в достаточно широком диапазоне $\mu = 0 \dots 0,5$.

Пластические свойства материала учитывают аппроксимирующей кривой, близкой к истинной диаграмме напряжение-деформация, полученной по результатам испытаний при одноосном растяжении. Аппроксимирующая кривая представляется как зависимость в виде степенной (как правило) функции величины эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}$ от величины эквивалентной пластической деформации $\bar{\varepsilon}^P$:

$$\bar{\sigma} = f\left(\bar{\varepsilon}^P\right). \quad (3)$$

В источниках [11,13] предлагаются различные виды аппроксимирующей функции. Однако в работе [11] сделан акцент на то, что в процессе резания величина эквивалентной пластической деформации $\bar{\varepsilon}^P$ может достигать значения 4, тогда как при одноосном растяжении только 0,2-0,4, т.е. аппроксимирующая функция может хорошо согласовываться с результатами экспериментальных замеров и давать значительную погрешность при больших значениях $\bar{\varepsilon}^P$. Таким образом, при выборе аппроксимирующей функции, необходимо проводить дополнительные испытания на предварительно прокатанных образцах.

Учет исчерпания материалом способности к пластическому деформированию и наступление начала разрушения может осуществляться различными способами, основываясь на законы механики разрушения [14].

Используя метод конечных элементов, весь объем тела разбивают на конечное число элементов и приближенно решают уравнения равновесия (1). Причем в последнее время, при решении задач пластического течения, широко используется, так называемая, формулировка ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) – произвольная формулировка Лагранжа–Эйлера. При такой формулировке в системе отсчета не обязательно координаты деформированного состояния тела связываются с координатами тела до деформации (формулировка Лагранжа) и не обязательно

связываются с координатами деформированного состояния тела (формулировка Эйлера), т.е. система координат может быть избрана независимо от деформированного состояния тела – относительная система координат. Особенностью формулировки ALE есть то, что топология сетки (число элементов и их взаимосвязь) постоянна в течение всей симуляции процесса [11,15].

Стационарные процессы, подобные резанию гильотинными и дисковыми ножами, могут рассматриваться как задачи течения с поверхностями, вступающими в контакт с инструментами, свободными поверхностями, большими локальными деформациями и вязким разрушением. Устойчивое состояние стационарного процесса может определяться с помощью продолжения быстротечного вычисления, пока будет достигнуто устойчивое состояние. Формулировка ALE наиболее подходящая для вычисления устойчивого состояния таких процессов. Когда начинают вычисления, то рассматриваемый объем достаточно близок к устойчивому состоянию объема и включает трещину (рис. 1), при этом можно избежать искажения сетки и корректно описать свободные поверхности. Это значит, что вычисление геометрии устойчивого состояния необходимо сделать для начальной сетки (точная форма свободных поверхностей и трещины заранее не известны).

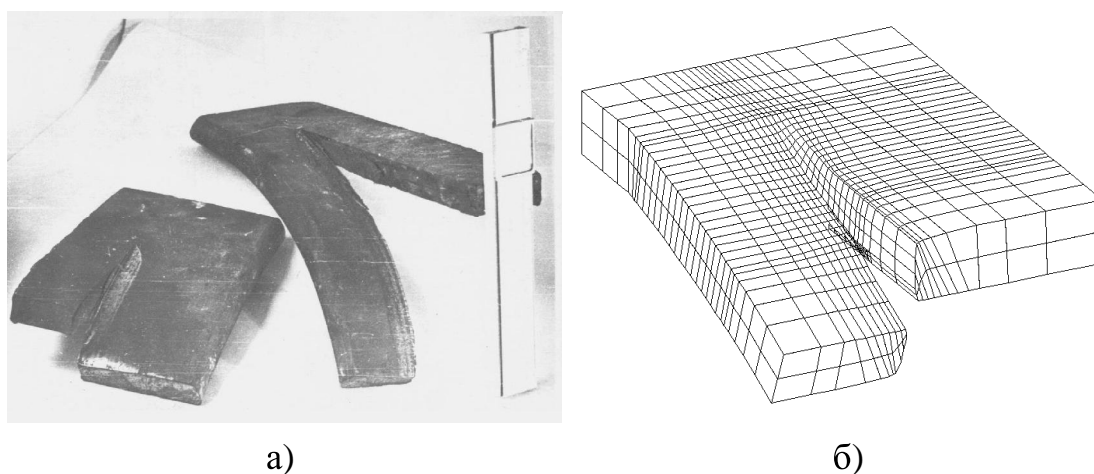


Рисунок 1 – Образцы металла разрезанного на дисковых ножницах (а) и вариант начальной сетки при численной симуляции процесса (б)

При решении уравнений в формулировке ALE существуют различные подходы, которые можно подразделить на связанный, несвязанный и полусвязанный. Каждый из названных подходов имеет свои преимущества и недостатки, которые, в определенной степени, сказываются на конечном результате моделирования. Сравнительный анализ данных подходов, с точки зрения объемов и скорости вычислений, выпол-

нен в работе [11], где для моделирования процессов резания избран полусвязанный подход. Однако сравнение конечного результата при решении аналогичной задачи с использованием других подходов не выполнено. Таким образом сложно оценить степень влияния каждого из подходов на результаты симуляции.

Выводы. Преимущество среди теоретических методов анализа процесса резки металла на дисковых ножницах принадлежит численной реализации методом конечных элементов и заключается в возможности более полной и, в то же время, достаточно дифференцированной оценке степени влияния самых различных факторов. Одновременно появляется возможность реализации многовариантных подходов, что способствует повышению степени научной обоснованности принимаемых технических решений.

Максимально полная степень отображения реального процесса резки металла на дисковых ножницах может быть получена при соблюдении следующих условий:

- корректное описание условий контакта между инструментом и материалом;
- проведение дополнительных экспериментов для правильного выбора аппроксимирующей функции, учитывающей пластические свойства материала;
- правильный выбор способа, учитывающего исчерпание материалом способности к деформированию и наступление начала разрушения;
- адекватный выбор формулировки метода конечных элементов, а также подхода при численной реализации.

Результаты работы могут быть использованы при построении математической модели и численной симуляции процесса резки металла на дисковых ножницах с целью последующей разработки конкретных практических рекомендаций и технических решений, а также при создании технологий и оборудования процессов резки металла ножницами.

Приведены результаты развития методов численного моделирования, а также аспекты, подходы и проблемы численной реализации процесса резки металла на дисковых ножницах методом конечных элементов.

The results development of methods numeral modeled, and also aspects, approaches and problems of numeral realization process cutting of metal, on disks scissors by the finite element method.

Библиографический список.

1. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
3. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
4. Теллес Д.К.Ф. Применение методов граничных элементов для решения неупругих задач. – М.: Стройиздат, 1987. – 160 с.
5. Finite volume computational methods for polymer processing / R.I. Tanner, X. Huang, S.-C. Xue, N. Phan-Thien, // Proc. of the 7 Int. Conf. on numerical methods in industrial forming processes. – Enschede (Netherlands). – 1998. – P. 3-9.
6. Analysis of metal forming process based on meshless method / J.-S. Clıcil, C. Roque, C. Pan, S.T. Button // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – №80-81. – P. 642-646.
7. Анил К.Дж., Жиангчанг М., Моуддин К.М. Введение в искусственные нейронные сети // Открытые системы. – 1997. – №4. – С. 16-24.
8. Гринкевич В.А., Данченко В.Н. Краткий обзор современных методов решения краевых задач обработки металлов давлением и основные тенденции их развития // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. - Том 5: Пластична деформація металів. - Дніпропетровськ: "Системні технології". – 2002. – С. 113–118.
9. Потапкин В.Ф. Метод полей линий скольжения в теории процессов обработки металлов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2005. – 160 с.
10. Pantale O., Rakotomalala R., Touratier M. An ALE three-dimensional model of orthogonal and oblique metal cutting processes. // International Journal of Forming Processes. – 1998, Vol 1, N° 3. – pp 371-389.
11. Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis, University of Twente, The Netherlands January 2000. Author: H.H.Wisselink.
12. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 310 с.
13. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: «Машиностроение», 1976. – 400 с.
14. Вычислительные методы в механике разрушения. / Под ред. С. Атлури. – М.: «Мир», 1990. – 392 с.
15. Title: Developments of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method in non-linear Solid Mechanics. Applications to Forming Processes. Ph.D-Thesis, University of Twente, The Netherlands 1999. Author: H.C. Stoker.