

УДК 621.771

ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ершов С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением»
Штода М.Н., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением» (makshtoda@gmail.com)

Днепродзержинский государственный технический университет
(51918, Украина, г. Днепродзержинск, Днепропетровская обл., ул. Днепростроевская, д. 2)

Аннотация. Исследовано влияние формы конечных элементов, на которые разбивается образец при моделировании процесса прокатки прямоугольной полосы на гладкой бочке, на точность определения скоростей продольного течения в каждой точке очага деформации. Моделирование процесса прокатки проводили с использованием метода штрафных функций при помощи программного пакета ESVDform, разработанного на кафедре ОМД ДГТУ. Анализ результатов расчетов позволил рекомендовать для решения задач с равномерной деформацией использовать конечные элементы в виде прямоугольных призм, которые обеспечивают высокую точность прогнозирования величин скоростей и их эпюр. Применение тетраэдральных элементов рекомендуется ограничить случаями с большой неравномерностью деформации по очагу.

Ключевые слова: прокатка, вариационная задача, метод штрафных функций, прямоугольные элементы, тетраэдральные элементы, точность моделирования.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-284-286

Анализ литературы [1 – 5] показал, что способ и качество разбиения исследуемого пространства на конечные элементы существенно влияют на точность решения вариационной задачи. Однако теоретического обоснования выбора вида конечного элемента для задач теории прокатки нет. Становится понятно, что проверку точности решения задач ОМД лучше проводить для тех случаев, для которых известны из экспериментов точные данные по виду распределения скоростей и напряжений в очаге деформации.

Целью настоящей работы является исследование влияния формы конечных элементов, на которые разбивается образец при моделировании процесса прокатки прямоугольной полосы на гладкой бочке, на точность определения скоростей продольного течения в каждой точке очага деформации.

Для большинства процессов ОМД определение деформаций и напряжений теоретическим путем возможно только при введении упрощающих гипотез о протекании реального процесса [6].

Моделирование процесса прокатки проводили при помощи программного пакета ESVDform, разработанного на кафедре ОМД Днепродзержинского государственного технического университета. Чтобы исключить влияние на точность расчета всех факторов, кроме формы конечного элемента, в тексте программы изменялась только часть, рассчитывающая функции формы, и менялся алгоритм разбиения полосы на элементы. Следует отметить, что при разбиении полосы на тетраэдры применялся алгоритм разбиения полосы с полной симметрией и измельчением сетки в местах с наибольшей

деформацией. Также сетка из тетраэдров перестраивалась по ходу расчета в случае вырождения элементов. Сетка из параллелепипедов не перестраивалась, все элементы были одного размера. Моделирование проводили с использованием метода штрафных функций.

Вариационное уравнение, использовавшееся для расчета, имеет вид

$$\delta \left[\frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau v_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (v_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0,$$

где μ – условная вязкость металла; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_τ и v_τ – полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности S инструмента; t_1 – штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости; $\varepsilon_0 = \frac{1}{3} (\xi_x + \xi_y + \xi_z)$ – скорость относительного изменения объема; t_2 – штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости; v_n – проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке; ω_n – проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке; V – объем деформируемого металла.

Общая методика моделирования изложена в работе [3].

Для определения точности расчета в зависимости от формы элемента было проведено сравнение эпюр продольной составляющей скорости течения частиц металла в различных сечениях геометрического очага деформации, полученных экспериментальным путем в

работе [6, рис. 140, номер образца 4], с эпюрами, полученными в результате теоретического моделирования. Для моделирования определены следующие условия эксперимента [6, рис. 137, узловая точка 4]: заготовка 19,2×80 мм; зазор между вальками 16,2 мм; диаметр валков 80 мм; частота вращения валков 100 об/мин; температура образца 1100 °С.

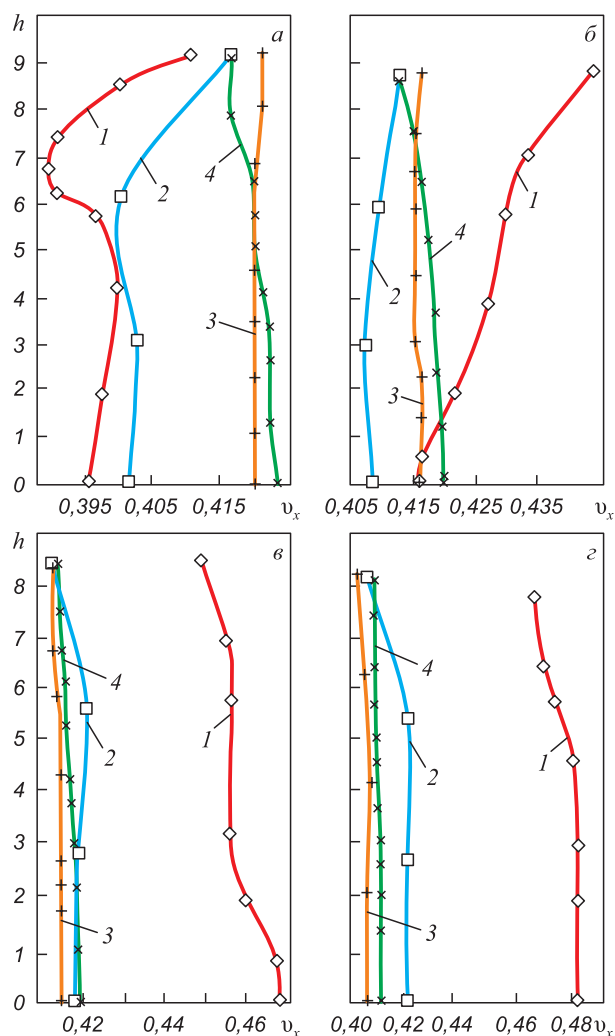
Параметры плоской сетки (поперечное сечение заготовки) такие: параллелепипед 2,5×4 мм; стороны треугольника 5 и 3 мм.

Анализ результатов расчетов показывает, что наибольшая точность решения была получена при разбиении заготовки на параллелепипеды (см. рисунок). Особенно интересен тот факт, что характер изменения продольной скорости течения металла по высоте заготовки абсолютно одинаков для данных, полученных при проведении эксперимента [6] и при теоретическом расчете с разбиением образца на параллелепипеды. Это говорит о том, что при расчете напряженного состояния при разбиении на параллелепипеды характер распределения напряжений по сечению заготовки будет такой же, как у экспериментальных данных.

В результате моделирования процесса прокатки на гладкой бочке при разбиении заготовки на тетраэдры были получены неудовлетворительные результаты. Эпюры скоростей течения металла, полученные в результате эксперимента и при моделировании, не совпадают даже по характеру распределения по высоте очага деформации (см. рисунок). При этом из рисунка видно, что измельчение сетки практически не изменяет картину.

Следует отметить, что полученные данные не отрицают возможность использования конечных элементов в форме тетраэдров при решении задач ОМД. Приведенные данные говорят о том, что тетраэдры позволяют рассчитать общее формоизменение практически с той же точностью, что и прямоугольные элементы. Но тетраэдры сложно использовать для тонкого анализа распределения скоростей и напряжений внутри очага деформации и за его пределами в условиях равномерной деформации. Особенно опасно использовать тетраэдры для анализа напряженного состояния, так как поле напряжений зависит от вида эпюры скоростей, при этом заполнение калибра может не измениться. Можно предположить, что область использования тетраэдральных элементов лежит в области решения задач сложного деформирования, где погрешности, вносимые аппроксимацией элемента, будут менее выражены по сравнению с величиной неравномерности деформации, которая в основном определяет направления течения частиц металла.

Выводы. Показано, что при решении задач с равномерным деформированием использование конечных элементов в форме тетраэдра приводит к большим погрешностям в определении вида эпюр скоростей течения металла. Для решения таких задач рекомендуется



Эпюры продольных составляющих скоростей течения частиц металла в различных сечениях геометрического очага деформации: а – плоскость касания полосы с вальками; б – четверть очага деформации; в – половина очага деформации; г – три четверти очага деформации;

1 – эксперимент; 2 – прямоугольная сетка; 3 и 4 – тетраэдры со стороной 5 и 3 мм

Diagrams of irrotational components of flow velocity of metal particles in different sections of geometrical deformation zone: а – contact plane of the zone with rollers; б – quarter of a deformation zone; в – half of a deformation zone; г – three-quarters of a deformation zone;

1 – experiment; 2 – rectangular mesh; 3 and 4 – tetrahedrons with the sides of 5 and 3 mm

использовать конечные элементы в виде прямоугольных призм, которые обеспечивают высокую точность прогнозирования величин скоростей и их эпюр. Рекомендуется ограничить область использования тетраэдральных элементов случаями с большой неравномерностью деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А.С. Сахаров, В.Н. Кислоцкий, В.В. Киричевский и др. – Киев: Вища школа, 1982. – 480 с.

2. Норри Д., Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
3. Илюкович Б.М., Измайлова М.К., Нехаев Н.Е. Теоретические основы механики деформируемой сплошной среды. Т. 2. – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2007. – 306 с.
4. Теоретические основы обработки металлов давлением. Т. 2 / Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев и др. – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2002. – 485 с.
5. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.
6. Полухин П.И., Воронцов В.К., Кудрин А.Б. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением. – М.: Metallurgiya, 1974. – 335 с.

Поступила 5 декабря 2013 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 4, pp. 284–286.

PRECISION OF MODELING OF METAL FORMING BY FINITE ELEMENTS METHOD

S.V. Ershov, M.N. Shtoda

Dneprodzerzhinsk State Technical University, Dneprodzerzhinsk, Ukraine

Abstract. The paper describes the study of influence of finite element form that is used for partitioning of rectangular strip in simulation of rolling process with the use of smooth rolls. The accuracy of determining of velocity in longitudinal direction has been analyzed at each point of the deformation zone. Simulation of the rolling process has been performed using the penalty functions method and ESVDdeform software package that was developed at the Chair of Metal Forming of DSTU. The results of the analysis allow recommending the 3D finite elements of rectangular form for practical use. It grants high accuracy of velocities prediction. The tetrahedral elements have been recommended to use in the cases when the accuracy of velocities prediction is not very important, but a large uneven strain distribution is presented in deformation zone.

Keywords: rolling, variational task, method of penalty function, finite element, rectangular elements, tetrahedral elements, precise of simulation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-284-286

REFERENCES

1. Sakharov A.S., Kislookii V.N., Kirichevskii V.V. etc. *Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdykh tel* [Method of finite elements in the mechanics of solids]. Kiev: Vishcha shkola, 1982, 480 p. (In Russ.).
2. Norrie D. H., de Vries G. *An introduction to finite element analysis*. Academic Press, New York, 1978. (Russ.ed.: Norrie D., de Vries G. *Vvedenie v metod konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1981. 304 p.).
3. Ilyukovich B.M., Izmailova M.K., Nekhaev N.E. *Teoreticheskie osnovy mekhaniki deformiruemoi sploshnoi sredy. T. 2* [Theoretical foundations of the continuous mechanics under deformation. Vol. 2]. Dnepropetrovsk: RIA Dnepr-VAL, 2007, 306 p. (In Russ.).
4. Ilyukovich B.M., Ogurtsov A.P., Nekhaev N.E., Ershov S.V. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem. T. 2* [Theoretical bases of metal forming. Vol. 2]. Dnepropetrovsk: RIA Dnepr-VAL, 2002, 485 p. (In Russ.).
5. Danchenko V.N., Milenin A.A., Kuz'menko V.I., Grinkevich V.A. *Komp'yuternoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem. Chislennyye metody* [Computer simulation of metal forming processes. Numerical methods]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2005, 448 p. (In Russ.).
6. Polukhin P.I., Vorontsov V.K., Kudrin A.B. *Deformatsii i napryazheniya pri obrabotke metallov davleniem* [Deformations and stresses in the processing of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 335 p. (In Russ.).

Information about the authors:

S.V. Ershov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metal Forming"

M.N. Shtoda, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming" (makshtoda@gmail.com)

Received December 5, 2013