

УДК 621. 774.72

Попова О. В.
Серeda В. Г.
Пономарев Д. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ В ПРОЦЕССЕ ОБКАТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

Неотъемлемой частью современных теоретических исследований в различных областях технологии обработки металлов давлением является численный анализ на основе метода конечных элементов. Многие процессы ОМД характеризуются большими значениями эквивалентной пластической деформации и сложным характером течения металла в очаге деформации.

Обкатка – это процесс обработки металла, используемый в производстве полых осесимметричных деталей. Обкатка часто используется для изготовления высокоточных и высокопроизводительных трубчатых компонентов. Преимущества процесса заключаются в высоком уровне использования материала, небольшого количества стадий обработки, малые формирующие усилия [1].

Было проведено множество экспериментальных и теоретических исследований, благодаря которым были выдвинуты многие теоретические модели и методы анализа распределения напряжений и деформаций, усилий, удлинения, исследование микроструктуры в процессе обкатки [2–8]. Среди многочисленных методов анализа, метод конечных элементов (МКЭ) является самым мощным и наиболее широко используется в последние десятилетия. Например, в работе [1] результаты при моделировании процесса многопроходного смещения горловины трубы при обкатке показали, что распределение деформаций и напряжений являются не осесимметричными; эквивалентные напряжения распределяются и изменяются вдоль осевого направления сечения детали и достигают максимума при раскрытии конца цилиндрической заготовки. Уменьшение толщины на горловине, и эллиптичность и осевое удлинение цилиндрической заготовки увеличивается с увеличением обкатного шага. В работе [9] на основе конечно-элементной модели для получения горловины из трубы обкаткой при повышенных температурах, получено влияние различных параметров на формирование детали. При анализе несимметричной обкатки трубной заготовки [10], использование конечно-элементного моделирования позволило сказать, что большие остаточные напряжения и утонение стенки заготовки происходят в области диаметрального увеличения и зажатия металла. Такая область становится основной зоной образования дефектов.

Однако, из-за сложности механизма деформации в процессе обкатки заготовки необходимо применять некоторые допущения в процессе анализа для получения результата. Например, в работе [11] не учитывалась взаимосвязь скорости деформации и температурных эффектов, что позволило проанализировать распределение тангенциальных напряжений, распределение напряжений по толщине, изменение толщины в направлении оси X алюминиевой заготовки на различных стадиях обкатки.

Целью данной работы является моделирование процесса обкатки плоским инструментом для установления механизма складкообразования заготовки и определения режимов обкатки при обкатке на режимах, близких к предельным.

Для достижения данной цели было выполнено конечно-элементное моделирование процесса обкатки тонкостенной трубчатой заготовки плоским инструментом трения в программе ABAQUS.

Исследовалась обкатка трубчатой заготовки диаметром $D_0 = 62$ мм, толщина стенки заготовки $S_0 = 2,5$ мм, угол поворота инструмента до 20° , частота вращения заготовки 10 с^{-1} . В качестве материала заготовки был принят алюминий. В связи с тем, что в задачи

рассматриваются изотермические условия деформации, для описания поведения материала при деформировании была использована модель со следующими характеристиками: модуль упругости первого рода $E = 0,8 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,32$; плотность $\rho = 2710$ кг/м³.

Расчетная схема смоделированного процесса обкатки представлена на рис. 1.

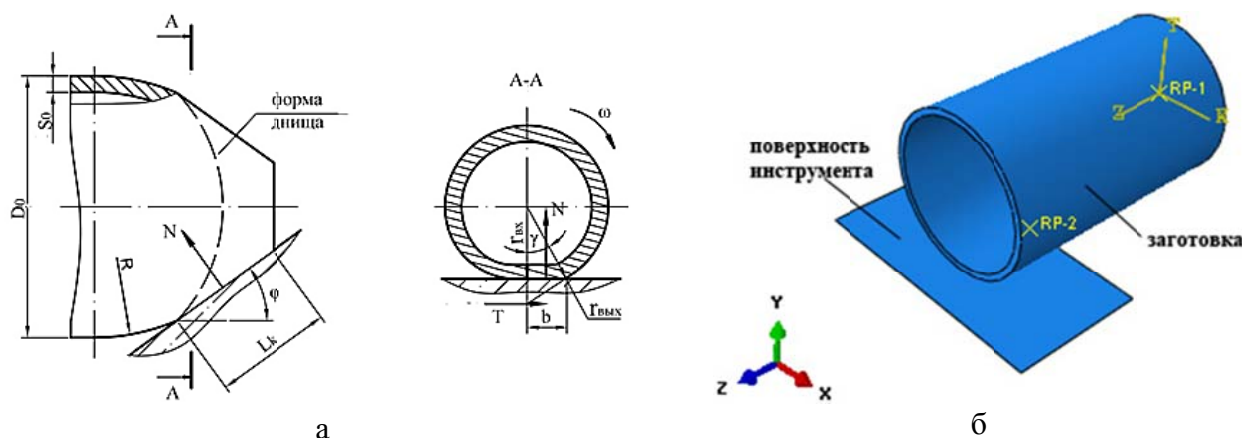


Рис. 1. Схема действия сил при обкатке (а) и геометрическая модель обкатки плоским инструментом трения (б)

Для постановки конечно-элементной модели были приняты следующие допущения:

- изменением температуры в ходе обкатки можно пренебречь;
- поскольку процесс характеризуется высокими скоростями деформации, в расчете необходимо учитывать зависимость напряжения текучести материала от скорости деформации. Для описания поведения материала заготовки при деформировании использовалась упруго-пластическая модель [12];
- инструмент рассматривается как жесткое тело.

Диаграмма упрочнения алюминия при температуре 450 °С и различных скоростях деформации, что использовалась при моделировании, показана на рис. 2.

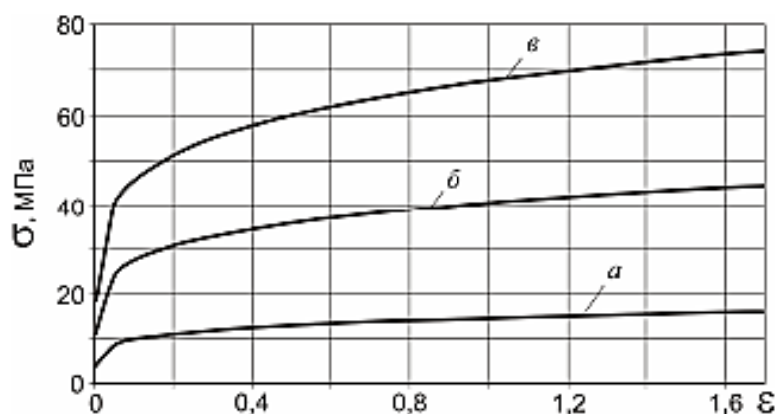


Рис. 2. Диаграмма упрочнения алюминия при температуре 450 °С и разных скоростях деформации:

а – $\dot{\epsilon} = 0,001$ с⁻¹; б – $\dot{\epsilon} = 1$ с⁻¹; в – $\dot{\epsilon} = 100$ с⁻¹

При моделировании заготовка разбивалась на конечное множество простых элементов для построения конечно-элементной сетки (рис. 3). Плоский инструмент является жестким элементом типа rigid, трубчатая заготовка – восьмиконечный элемент типа C3D8R. Общее число конечных элементов модели заготовки и инструмента составило 33592. Количество элементов, которыми моделировался инструмент, было равно 3880.

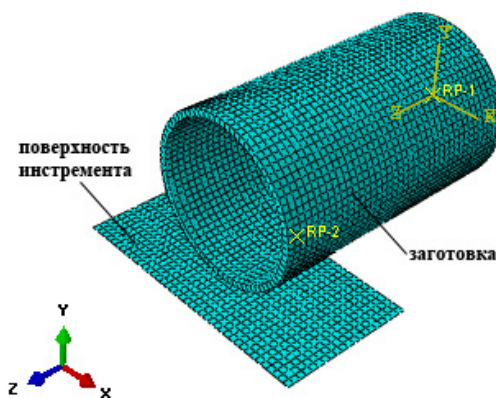


Рис. 3. Конечно-элементная модель трубной заготовки при моделировании процесса обкатки плоским инструментом

Для моделирования в глобальной системы координат были приняты следующие граничные условия: плоский инструмент имеет одну вращательную степень свободы относительно оси X , заготовка – одну вращательную степень свободы по оси Z .

Деформируемая часть поверхности заготовки скользит по поверхности инструмента, что описывается моделью контакта «surface-to-surface», коэффициент трения принимается равным $\mu = 0,2$ по всей контактной поверхности и подчиняется закону трения Амонтона-Кулона.

Из-за большого количества шагов при моделировании процесса обкатки трубной заготовки был использован метод двойной точности расчета «double-precision», чтобы избежать влияния ошибок из-за округления.

Для описания процесса складкообразования при обкатке в качестве выходных параметров были выбраны значения деформаций, напряжений в элементах трубы, фиксировались значения площади контакта, контактное давление и усилие на поверхность инструмента и др.

При оптимальном режиме обжатия заготовки в процессе обкатки ($t = 0,5-0,8$ с) технологический процесс становится стабильным, эквивалентные напряжения на заготовке не превышают 42 МПа, материал переходит в зону пластических деформаций. Степень пластических деформаций имеет величину около 4. При последующем протекании процесса изменение эквивалентных напряжений незначительно, увеличивается только степень пластической деформации до 6,8. На рис. 4 представлен этап обкатки при угле поворота инструмента около 12° при установившемся режиме.

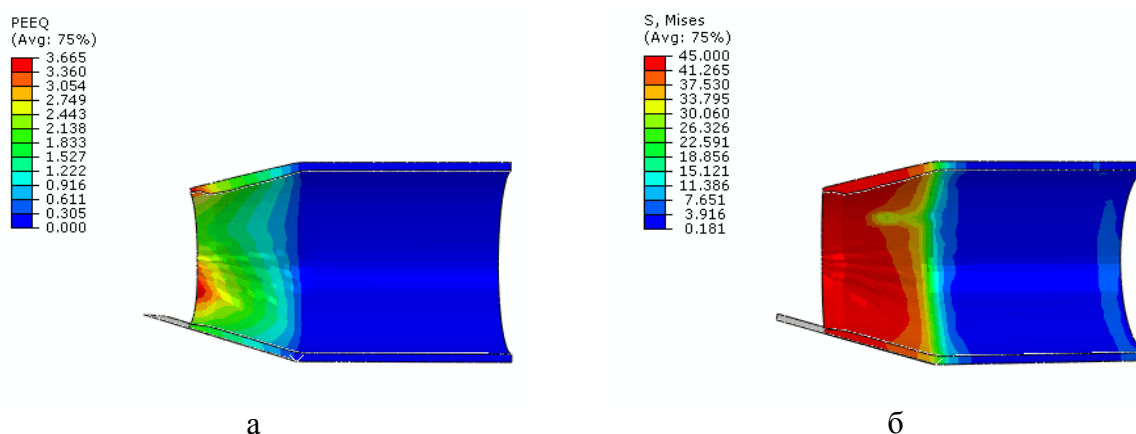


Рис. 4. Поля распределений пластических деформаций (а) и эквивалентных напряжений (МПа) (б) в заготовке при оптимальном режиме деформирования

Моделирование режимов обкатки достигалось изменением скорости поворота инструмента при одинаковой частоте вращения заготовки. При критических режимах обжатий могут возникать утолщения, искажения, выпуклость или образование слишком большого

участка контакта, что приводит к образованию вмятины из-за потери устойчивости заготовки. Моделирование показало, что потеря устойчивости происходит из-за резкого падения напряжений при входе заготовки в зону контакта, где непосредственно происходит обжим заготовки, о чем свидетельствуют максимальные контактные напряжения. На рис. 5 представлены виды складкообразования при потере устойчивости заготовки в разные временные промежутки.

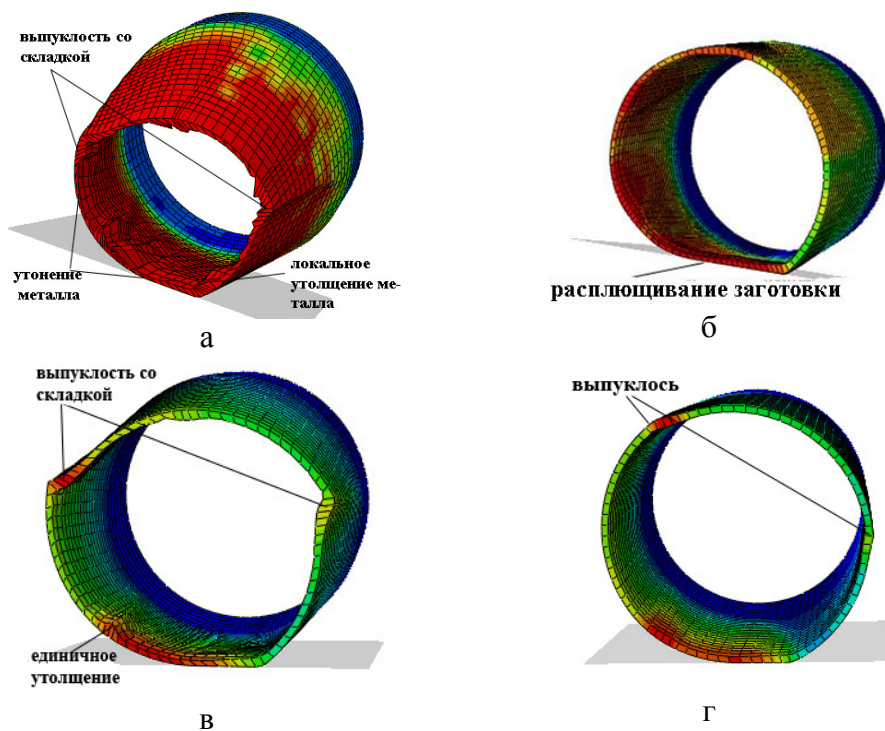


Рис. 5. Виды складкообразования при различных критических режимах деформирования трубчатой заготовки плоским инструментом трения:

а – при $\varphi = 13^\circ$, $\tau = 1,25$ с; б – при $\varphi = 7^\circ$, $\tau = 0,5$ с; в – при $\varphi = 5^\circ$, $\tau = 0,82$ с; г – при $\varphi = 2^\circ$, $\tau = 0,032$ с

Также следует отметить, что наплывы металла по толщине стенки большой величины не распределяются по ширине контакта на ранних этапах деформирования, а увеличиваются с каждым последующим оборотом заготовки, что приводит к ударам в момент входа такого наплыва в зону контакта, о чем свидетельствует пиковый характер графика усилий (рис. 6). Резкие перепады усилия приводят к большим колебаниям заготовки, что увеличивает возможность складкообразования.

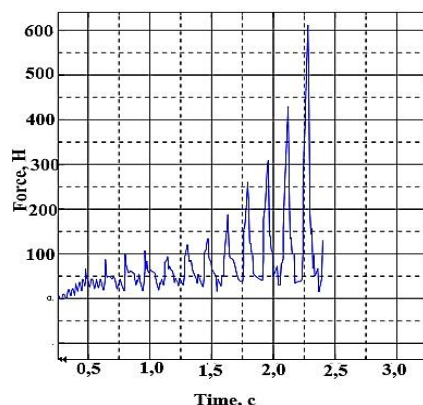


Рис. 6. График усилий модели с образованием единичных утолщений на заготовке

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе рассмотрения данной задачи, показали, что применение КЭМ в анализе технологических процессов обработки давлением позволяет глубже понять процессы, происходящие в момент деформирования заготовки. Это достигается благодаря возможности анализа очага деформации в любой момент времени, что невозможно углубленно провести опытным путем из-за быстротечности процесса. Анализ данных, полученных при конечно-элементном моделировании обкатки плоским инструментом трения тонкостенной трубы, позволил установить механизм складкообразования, что позволяет подобрать оптимальные режимы для формообразования изделия, что существенно увеличит его качество и конкурентоспособность на рынке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xia Q. X. Numerical simulation and experimental research on the multi-pass neck-spinning of non-axisymmetric offset tube / Q. X. Xia, S. W. Xie, Y. L. Huo, F. Ruan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 206. – P. 500–508. – ISSN 0924-0136.
2. Fabrication of 2024 aluminum spun tube using a thermomechanical treatment process / S. Chang, C. Wang, C. Huang, Y. Chang; T. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 108. – P. 294–299. – ISSN 0924-0136.
3. Rajana K. M. Effect of heat treatment of preform on the mechanical properties of flow formed AISI 4130 Steel Tubes – a theoretical and experimental assessment / K. M. Rajana, P. U. Deshpandea, K. Narasimhanb // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 125–126. – P. 503–511. – ISSN 0924-0136.
4. Xi-Cheng Gao Experimental research on a new technology – ellipse spinning / Gao Xi-Cheng, Kang Da-Chang, Menga Xiao-Feng, Wub Hai-Jiang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1999. – Vol. 94. – P. 197–200. – ISSN 0924-0136.
5. Xue Kemin A study of the rational matching relationships amongst technical parameters in stagger spinning / Xue Kemin, Lu Yan, Zhao Xianming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – Vol. 69. – P. 167–171. – ISSN 0924-0136.
6. Капорович В. Г. Исследование технологических параметров закатки полой цилиндрической заготовки в сферическую / В. Г. Капорович // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1964. – № 12. – С. 15–18.
7. Залесский В. И. Экспериментальное исследование усилия закатки днищ / В. И. Залесский, А. Г. Кобелев, Е. А. Колмаков // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1967. – № 8. – С. 25–28.
8. Залесский В. И. Определение усилий при закатке днищ плоским инструментом / В. И. Залесский, А. Г. Кобелев // *Известия высших вузов. Черная металлургия*. – 1967. – № 7. – С. 113–116.
9. Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature / Chi-Chen Huang, Jung-Chung Hung, Chinghua Hung, Chia-Rung Lin // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 56. – P. 1039–1048. – ISSN 0268-3768.
10. Finite element analysis and experimental investigation on deformation mechanism of non-axisymmetric tube spinning / Qinxiang Xia, Xiuquan Cheng, Hui Long, Feng Ruan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 59. – P. 263–272. – ISSN 0268-3768.
11. Bai Q. Finite element modeling of power spinning of thin-walled shell with hoop inner rib / Q. Bai, H. Yang, M. Zhan // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2008. – Vol. 18. – P. 6–13. – ISSN 1003-6326.
12. Восканьяниц А. А. Моделирование технологических задач пластичности на основе Эйлера описания движения сплошной среды [Электронный ресурс] / А. А. Восканьяниц, А. В. Иванов // *Наука и образование, 2010. – М. : МГТУ им. Баумана. – Т. 2. – ISSN 1994-0408. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/137527.html>.*

Середа В. Г. – канд. техн. наук, доц. каф. МТО ДГМА;

Попова О. В. – аспирант ДГМА;

Пономарев Д. С. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: mto@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 28.05.2013 г.