

DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.43
УДК 539.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ

А.А. Роговой, Н.К. Салихова

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Работа посвящена численному моделированию процесса прессования стальной заготовки (сталь 30ХГСА), имеющей в начальном состоянии форму восьмигранной усеченной пирамиды. Моделирование соответствует технологической схеме, включающей осадку равномерно нагретого до определенной температуры слитка в форме пирамиды, его разгрузку, прессование с помощью деформирующих инструментов (подставки и штампа) в направлении, перпендикулярном к предыдущему, и последующую разгрузку. С использованием уравнения Рамберга–Осгуда и заимствованных из литературных источников механических свойств стали 30ХГСА при температуре 500°C построена диаграмма деформирования. С учетом больших пластических деформаций и нелинейных свойств материала определено напряженно-деформированное состояние заготовки и ее формоизменение на каждом этапе обработки давлением. В соответствии с технологией процесса решена нелинейная упругопластическая задача осадки стального слитка и последующей его разгрузки. Установлено, что после разгрузки заготовки величина интенсивности пластических деформаций остается практически неизменной (из-за малости упругих деформаций), а величина интенсивности напряжений существенно изменяется. Форма боковой поверхности исследуемого тела в конце операции осадки до величины 29,3% имеет вид выпуклой одинарной бочки. Выполнена серия вычислительных экспериментов, с помощью которых исследована точность конечно-элементного решения для процесса осадки при различной степени дискретизации расчетной области. На основе полученных результатов проведено численное моделирование следующих технологических этапов: штамповки заготовки с помощью деформирующих инструментов и ее разгрузки. Как и в случае осадки, в заготовке остаются значительные остаточные напряжения, связанные с неоднородностью пластических деформаций, возникающих при штамповке исследуемого тела. Расчет осуществлен в рамках теории пластического течения в приращении с помощью конечно-элементного программного продукта SIMULIA/Abaqus с использованием пошаговой процедуры и метода Ньютона–Рафсона для решения упругопластической задачи на каждом шаге.

Ключевые слова: большие пластические деформации, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, обработка металлов давлением, стальная заготовка

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF PRESSING STEEL BILLET

A.A. Rogovoy and N.K. Salikhova

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

The study is concerned with numerical modeling of the process of pressing of a steel billet (steel 30HGSA). The initial billet had a form of octahedral truncated pyramid. The modeling process was carried out in accordance with a manufacturing scheme that involves the upset forging of a billet (pyramid) uniformly heated to a predetermined temperature, its unloading, pressing using special tools (stand and punching die) in a direction perpendicular to the previous one, and subsequent unloading upon completion of the process. Using the Ramberg–Osgood equation and the reference data on the mechanical properties of steel 30HGSA at temperature 500°C, the deformation curve was plotted. The stress-strain state of the billet and its forming were determined at each stage of the forming operation with account for large plastic deformations and material's nonlinear properties. In compliance with the manufacturing scheme, a solution to the nonlinear elastic-plastic problem dealing with the study of the upset forging of a steel billet and its subsequent unloading was found. It was established that after unloading of the billet the plastic strain rate remains practically unchanged (because of small elastic deformations), while the resultant stress varies considerably. The lateral surface of the body at the end of the upset forging (by 29.3%) had the form of a convex full roll. A series of computational experiments was performed to study the accuracy of the finite element solutions for the process of upset forging of the billet at different degrees of discretization of the computational domain. The results obtained were used for numerical modeling of the following operating steps: pressing of the billet with the aid of deformation tools and its unloading. As in the case of upset forging, in the billet there remain significant residual stresses related to the inhomogeneity of plastic deformations occurred during the pressing of the body under study. All simulations were performed in the framework of increments plastic flow theory, using the finite element software SIMULIA/Abaqus with a step-by-step procedure and the Newton–Raphson method for solving the elastic-plastic problem at each step.

Key words: large plastic deformations, stress-strain state, finite-element modeling, metal forming, steel billet

1. Введение

Обработка металлов давлением — один из этапов промышленного производства [1]. К числу технологических операций обработки давлением относится прессование слитков с помощью деформирующих инструментов. В процессе такой обработки металл подвергается воздействию внешних сил, что приводит к возникновению в нем напряжений, превосходящих предел упругости. В результате происходит необратимое изменение формы заготовки, структуры материала и, как следствие, физико-механических свойств [2, 3]. Характеристиками, позволяющими количественно оценить тот или другой процесс, являются напряженное и деформированное состояния, возникающие в материале при обработке его давлением. В частности, по деформированному состоянию можно судить о степени проработанности структуры материала. Исследование напряженно-деформированного состояния слитка

можно проводить с помощью промышленного эксперимента. Однако этот способ является дорогостоящим, требует больших временных затрат и дает информацию в ограниченном количестве точек.

Более удобным и информативным является численный эксперимент. Использование современных программных продуктов позволяет моделировать технологические процессы обработки давлением без проведения дорогостоящих промышленных экспериментов. С помощью вычислительных экспериментов можно анализировать всю технологическую цепочку получения поковок, исследовать изменение формы, производить расчеты по определению напряженно-деформированного состояния в заготовках и так далее.

В данной работе в рамках теории пластического течения в приращениях проводится трехмерное численное моделирование процесса прессования стальной заготовки с помощью конечно-элементного программного пакета SIMULIA/Abaqus, позволяющего решать физически и геометрически нелинейные упругопластические задачи. Определены напряженно-деформированное состояние и формоизменение заготовки на каждом технологическом этапе обработки ее давлением.

2. Описание технологического процесса и основные допущения модели

Моделируется процесс прессования заготовки из высококачественной легированной стали марки 30ХГСА, имеющей первоначальную форму в виде восьмигранной усеченной пирамиды с исходными размерами, представленными на рисунке 1а. Упрощенный вид трехмерной геометрической модели, выполненной с помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus, изображен на рисунке 1б. Заготовка такого вида широко используется на ОАО «Мотовилихинские заводы» для производства цилиндрических изделий.

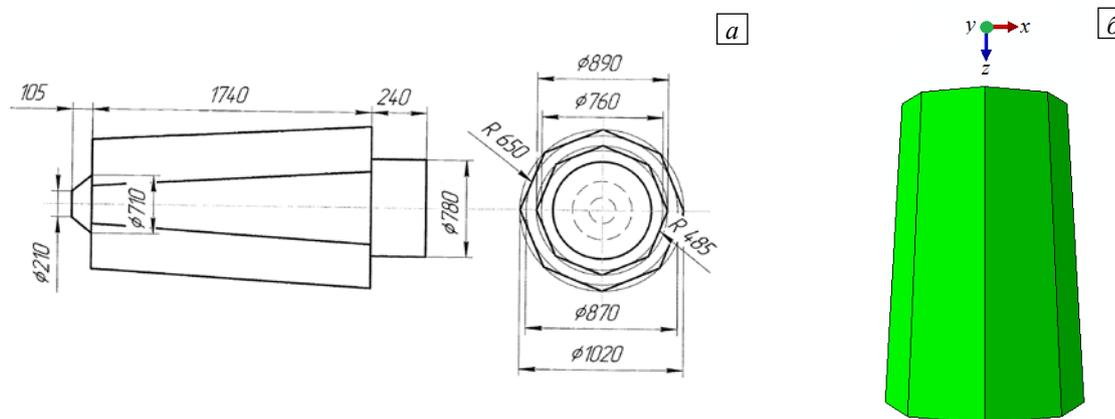


Рис. 1. Геометрия (а) и трехмерная модель (б) стальной заготовки

Технологический процесс обработки этого стального слитка давлением состоит из следующих операций. Сначала заготовка помещается в печь, нагревается до определенной температуры и выдерживается в печи несколько часов до получения в ней однородного распределения температуры. Затем слиток устанавливается вертикально, большим сечением вниз, как показано на рисунке 1б, и с помощью деформирующего инструмента (плоского штампа) осаживается с высоты (длины) 1740 мм до высоты (длины) 1230 мм (эту операцию далее будем называть осаживанием). Осевая деформация при этом достигает 29,3%. После осадки заготовка переводится в горизонтальное положение, укладывается на подставку, имеющую цилиндрический вырез, и прессуется с помощью штампа с таким же цилиндрическим вырезом (эту операцию далее будем называть прессованием).

Для численного моделирования процесса обработки давлением необходимо иметь аналитическое описание диаграммы деформирования стали марки 30ХГСА. С этой целью в литературе [4–7] были найдены механические характеристики этой стали при температуре 500°C: модуль упругости $E = 173$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел прочности $\sigma_s = 690$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 640$ МПа, $\delta = 21\%$ — остаточное удлинение после разрыва, $\sigma_{m1} = 608$ МПа — предел пропорциональности. По этим данным с использованием нелинейного уравнения Рамберга–Осгуда [8, 9]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n, \quad n = \ln \left(\frac{\delta - \sigma_{m1}/E}{0,002} \right) / \ln \left(\frac{\sigma_{m1}}{\sigma_{0,2}} \right)$$

построена кривая деформирования, вид которой приведен на рисунке 2. Стандартной процедурой эта кривая перестраивается в зависимость «интенсивность напряжений – интенсивность пластических

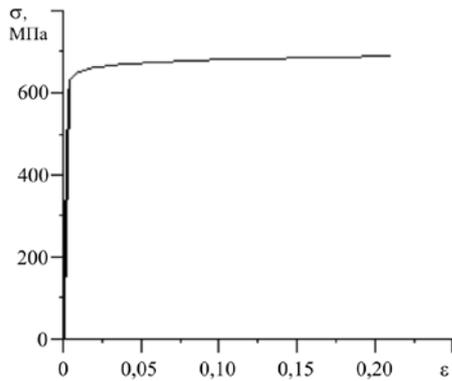


Рис. 2. Кривая деформирования стали марки 30ХГСА при температуре 500°C

контактного усилия сдвига, равного произведению нормального давления на коэффициент трения μ , который для процесса осадки значительный, а для процесса штамповки весьма мал. Такое различие в μ связано с тем, что в реальном технологическом процессе осадка осуществляется без смазки контактирующих поверхностей, а при штамповке в область контакта подается графитовая смазка. В результате на поверхностях контакта для задачи, описывающей процесс осадки, ставится условие полного прилипания, а для задачи, описывающей процесс штамповки, — полного проскальзывания (ставится контактная задача без трения).

3. Численное моделирование процесса осадки

В соответствии с технологией процесса сначала осуществляется осадка заготовки на заданную величину. Полагается, что нижний торец стального слитка (соответствующий большему сечению, см. Рис. 1б) жестко скреплен с недеформируемым основанием, а верхний торец осаживается недеформируемым штампом вдоль оси z на величину 510 мм при нулевых перемещениях вдоль осей x и y . В силу этих условий в слитке возникают большие неоднородные пластические деформации (бочкообразование), порождающие в материале неоднородное напряженно-деформированное состояние [1, 4]. Поэтому в вычислительном эксперименте, осуществленном на базе конечно-элементного комплекса SIMULIA/Abaqus, учитывалось как геометрическое (большие перемещения и деформации), так и физическое нелинейное поведение материала. Использовались пошаговая процедура решения задачи и тетраэдральные конечные элементы типа C3D4 (4-node linear tetrahedron) в обозначениях SIMULIA/Abaqus.

Сходимость процедуры решения упругопластической задачи на каждом шаге в программном комплексе SIMULIA/Abaqus достигается автоматически, и в данном случае для этого требуется не более 5 итераций. Точность решения зависит от числа конечных элементов. Была выполнена серия численных экспериментов по осадке стального слитка при различной величине шага кинематического нагружения и различной дискретизации расчетной области [10]. Установлено, что для достижения полной сходимости решения

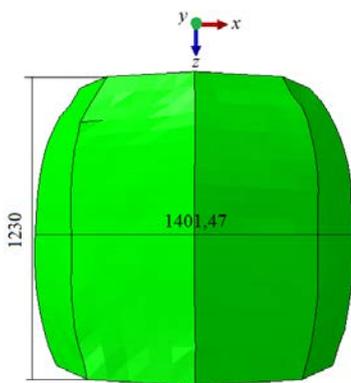


Рис. 3. Форма и размеры стального слитка в конце операции осадки

На рисунке 4 приведены распределения интенсивности напряжений по Мизесу и интенсивности пластических деформаций в сечении заготовки вертикальной плоскостью, проходящей через ее центральную ось.

деформаций», используемую в теории пластического течения для любых процессов и любых степеней деформаций.

Полагалось, что на всех этапах обработки заготовки давлением деформирование происходит при постоянной температуре 500°C — охлаждение при транспортировке и при взаимодействии заготовки с инструментами не учитывалось. Заготовка считалась изотропным упругопластическим телом. Контактная задача с трением при взаимодействии заготовки с элементами технологического оборудования, как таковая, не ставилась, так как считалось, что для процесса осадки усилие сдвига, вызывающее пластическое течение на контактирующих поверхностях, значительно меньше контактного усилия сдвига, а для процесса штамповки — наоборот. Это допущение вытекает из определения

(его практической неизменности при увеличении числа шагов и итераций) необходимо 28 шагов и 275124 элементов (50025 узлов). Вполне приемлемые результаты, отличающиеся на 7–9% от достигнутых при полной сходимости, получаются и при значительно меньшем количестве элементов. Поэтому для сокращения времени счета всего технологического процесса, включающего и осадку, и штамповку, заготовка была разбита на 14561 элементов, и для такой дискретизации на рисунках 3 и 4 представлены результаты вычислительного эксперимента в конце операции осадки.

Формоизменение боковой поверхности осаженого слитка иллюстрирует рисунок 3. Из него видно, что в конце процесса осадки имеет место одинарное бочкообразование с выпуклой формой боковой поверхности заготовки.

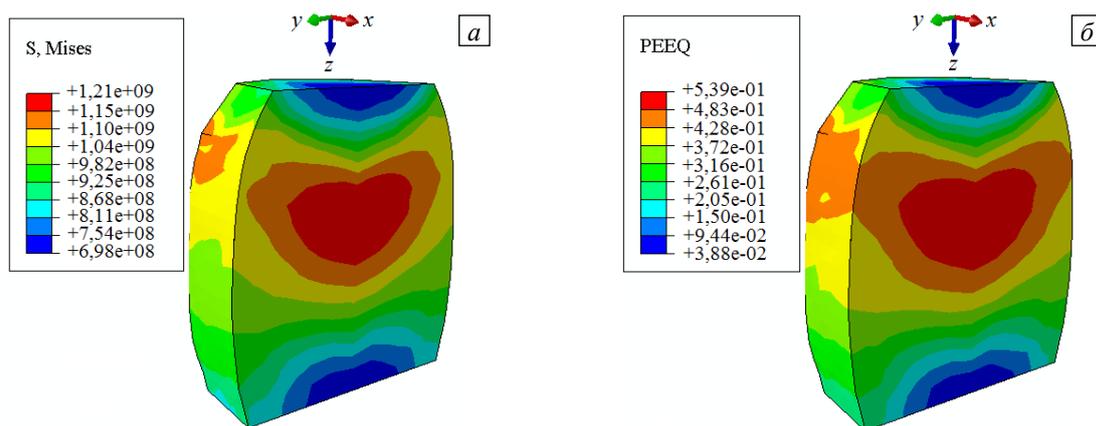


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений, Па (а) и интенсивности пластических деформаций (б) в сечении стального слитка и на прилегающих к нему поверхностях в конце процесса осадки

Далее, после обнуления усилий, полученных на торцах заготовки в конце процесса осадки, моделируется процесс разгрузки. Оказалось, что разгрузка является чисто упругой (малые деформации) без возникновения вторичных пластических деформаций, и здесь достаточно одного нагрузочного (разгрузочного для данного случая) шага. Полученные результаты приведены на рисунке 5.

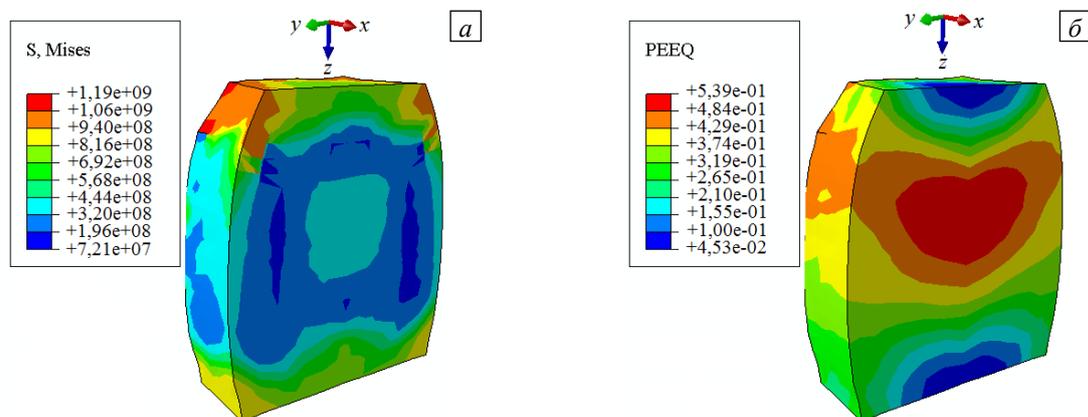


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений, Па (а) и интенсивности пластических деформаций (б) в сечении стального слитка и на прилегающих к нему поверхностях после разгрузки

Из рисунков 4 и 5 видно, что интенсивность пластических деформаций неоднородна в теле и после разгрузки практически не меняется (упругие деформации составляют десятые доли процентов). В силу этой неоднородности в заготовке после разгрузки присутствуют значительные остаточные напряжения.

4. Численное моделирование процесса прессования

На рисунке 6 представлена рассматриваемая в настоящей статье схема процесса прессования и дискретные (конечно-элементные) модели стальной заготовки и деформирующих инструментов.

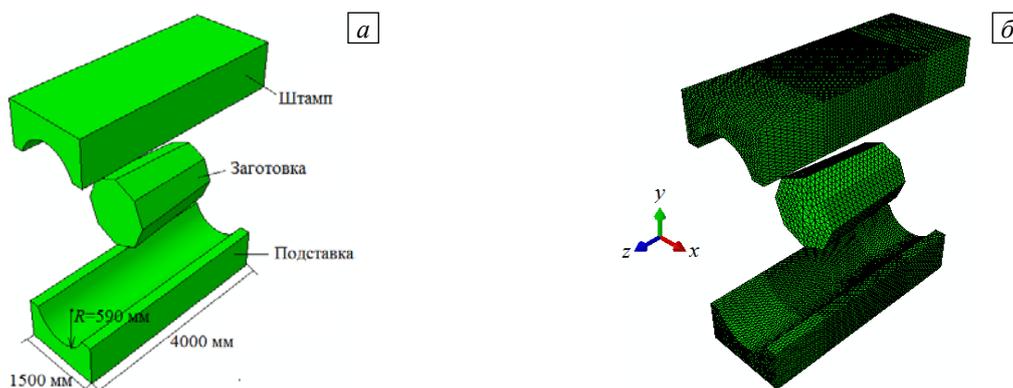


Рис. 6. Схема процесса прессования (а) и конечно-элементные модели заготовки и инструментов (б), выполненные в SIMULIA/Abaqus

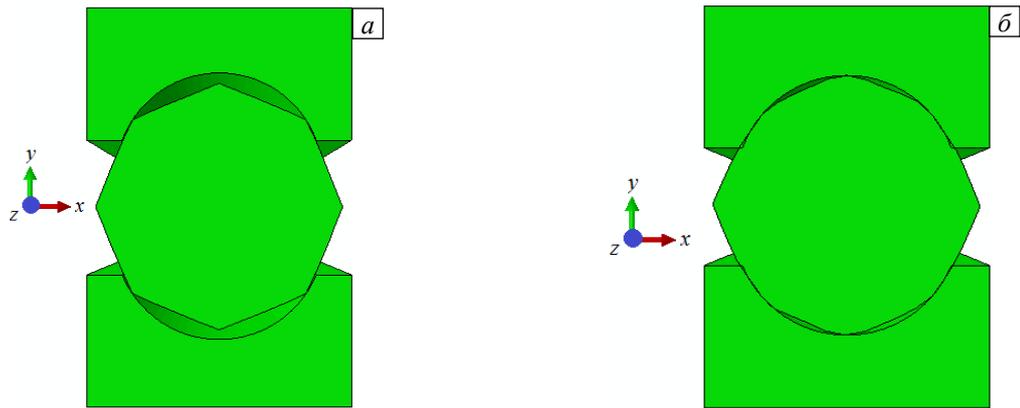


Рис. 7. Начальный контакт заготовки и инструментов (а); контакт заготовки и инструментов в конце процесса прессования (б). Показано среднее (по оси z) поперечное сечение системы «заготовка–инструменты» (Рис. 6)

Штамп входит в контакт с заготовкой, лежащей на подставке (Рис. 7а), и, перемещаясь вертикально (по оси y), деформирует ее (Рис. 7б).

Схема прессования, представленная на последнем рисунке, не в полной мере соответствует реальному процессу, а рассматривается как необходимый элемент для отладки программы. В отличие от задачи осадки, в которой основание и штамп считались абсолютно жесткими, здесь, в силу относительно тонких стенок у штампа и подставки, необходимо учитывать возможность их деформирования, несмотря на то, что модули упругости этих элементов технологического оборудования по величине на три порядка превосходят модуль упругости заготовки. Поэтому дискретизации подвергались и заготовка, и деформирующие инструменты. Как и в предыдущей задаче, использовались пошаговая процедура решения и тетраэдральные конечные элементы типа C3D4 со значениями остаточных перемещений, деформаций и напряжений в них, полученными в предыдущем разделе (в результате процесса разгрузки после осадки). Подставка и штамп были разбиты на 108169 и 113605 элементов соответственно, а заготовка — на 14561, как в предыдущем разделе. Причем на поверхностях контакта заготовки с подставкой и штампом, в отличие от задачи осадки, принято условие полного проскальзывания (ставилась контактная задача без трения). Полное перемещение штампа по оси y после контакта его с заготовкой составляет 145 мм. При решении упругопластической задачи этого раздела потребовалось 27 шагов и не более 7 итераций на каждом шаге. Оказалось, что пластические деформации возникают только в заготовке, а подставка и штамп, в силу принятых для них механических характеристик, работают упруго.

Рисунок 8 иллюстрирует результаты расчета напряженно-деформированного состояния при прессовании стальной заготовки. Видно (Рис. 8б), что в конце процесса прессования интенсивность пластической деформации достигает $\sim 60\%$.

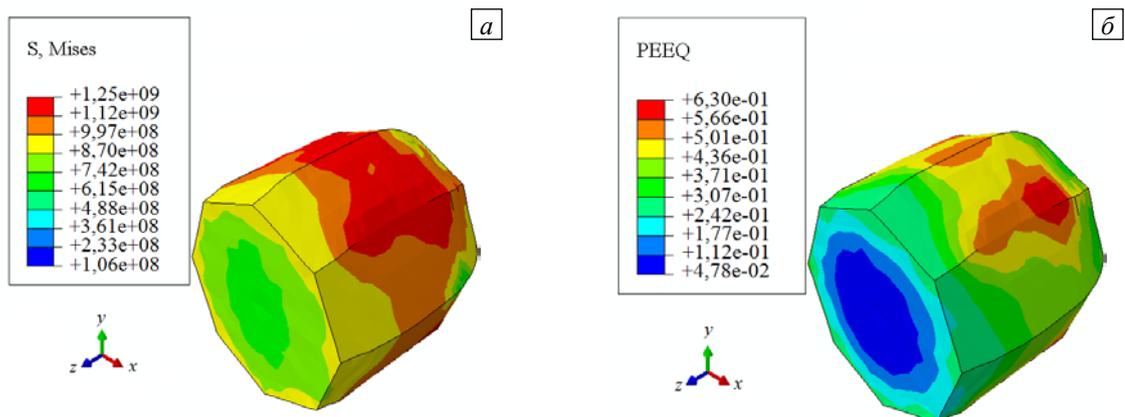


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений, Па (а) и интенсивности пластических деформаций (б) в заготовке в конце процесса прессования

На рисунке 9 представлена форма и геометрические размеры стальной заготовки в конце процесса прессования. Области контакта заготовки с деформирующими инструментами, соответствующие этому моменту, показаны на рисунке 7б, а перемещение штампа (Рис. 6а) по оси y из состояния, представленного на рисунке 7а, в состояние, соответствующее рисунку 7б, составляет 145 мм.

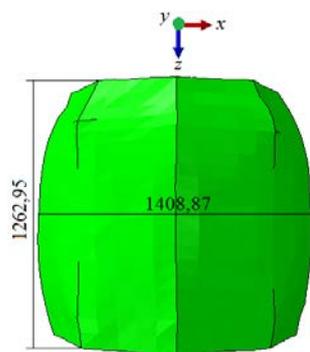


Рис. 9. Формоизменение боковой поверхности стальной заготовки после прессования

Далее, после обнуления усилий, полученных на поверхностях контакта в конце процесса прессования, моделируется процесс разгрузки. Разгрузка оказалась чисто упругой (малые деформации) без возникновения вторичных пластических деформаций, и здесь достаточно одного нагруженного (разгрузочного для данного случая) шага. Полученные результаты приведены на рисунке 10.

Из рисунков 8 и 10 видно, что величина интенсивности пластических деформаций неоднородна в теле и после разгрузки мало меняется, так как упругие деформации составляют десятые доли процента. В силу этой неоднородности в заготовке после разгрузки присутствуют значительные остаточные напряжения.

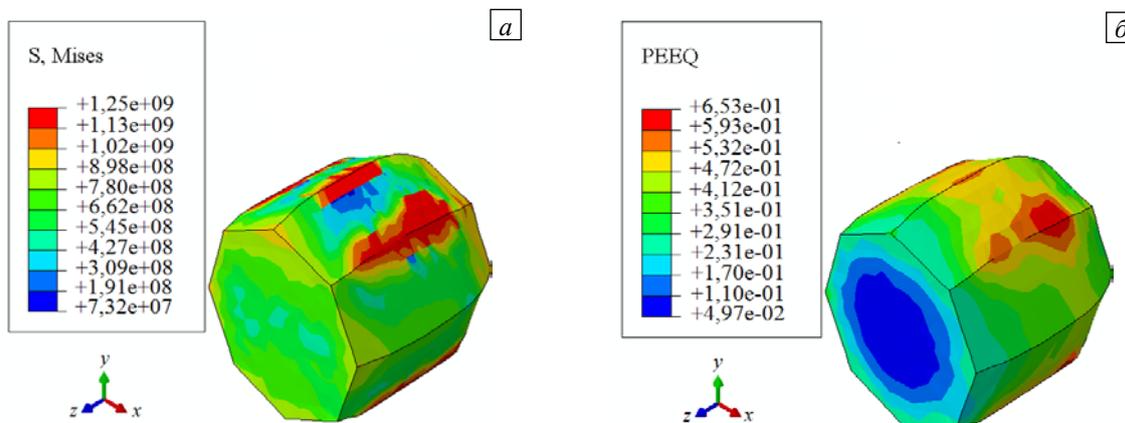


Рис. 10. Распределение интенсивности напряжений, Па (а) и интенсивности пластических деформаций (б) в слитке после прессования и разгрузки

5. Заключение

Разработана и численно реализована с помощью конечно-элементного программного пакета SIMULIA/Abaqus модель упругопластического процесса обработки стального слитка давлением. Модель отражает большинство этапов реального технологического процесса, таких как осадка, прессование и разгрузка. С учетом больших пластических деформаций и нелинейных свойств материала определено напряженно-деформированное состояние заготовки и показано ее формоизменение на каждом из этих этапов. Планируется использовать модель без существенной доработки для полного описания всех этапов реального технологического процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Литература

1. Павлов И.М., Федосов Н.М., Северденко В.П., Тарновский И.Я., Ланге Б.Л., Охрименко Я.М. Обработка металлов давлением / Под ред. И.М. Павлова. – М.: Metallurgizdat, 1955. – 484 с.
2. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Metallurgiya, 1980. – 320 с.
3. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 1. Физико-механические основы пластической деформации. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 306 с.
4. Зуев М.И., Кулыгин В.С., Виноград М.И., Остапенко А.В., Любинская М.А., Дзугутов М.Я. Пластичность стали при высоких температурах. – М.: Metallurgizdat, 1954. – 104 с.
5. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: Metallurgiya, 1976. – 488 с.
6. http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/30XGSA (дата обращения: 01.12.2014).
7. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Metallurgiya, 1973. – 224 с.
8. Банкина О.С., Дзюба А.С., Хватан А.М. Метод построения диаграмм деформирования « σ – ϵ » по справочным механическим характеристикам материала // Труды ЦАГИ. – 2000. – № 2639. – С. 36-38.
9. Bruhn E.F. Analysis and design of flight vehicle structures. – USA: Jacobs Publishing Inc., 1973. – 650 p.

10. Салихова Н.К. Расчет напряженно-деформированного состояния стального слитка в процессе осадки при больших деформациях // Теория и практика современной науки. Материалы XV Международной научно-практической конференции, Москва, 8-9 октября 2014. – Москва, 2014. – С. 102-109.

References

1. Pavlov I.M., Fedosov N.M., Severdenko V.P., Tarnovskij I.Ya., Lange B.L., Okhrimenko Ya.M. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1955. 484 p.
2. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyay S.E. *Teoriya prodol'noj prokatki* [The theory of longitudinal rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 320 p.
3. Gubkin S.I. *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic deformation of metals. Vol. 1. Physical–mechanical principles of plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgizdat, 1961. 306 p.
4. Zuev M.I., Kulygin V.S., Vinograd M.I., Ostapenko A.V., Lyubinskaya M.A., Dzугotov M.Ya. *Plastichnost' stali pri vysokih temperaturah* [Ductility of steel at high temperatures]. Moscow: Metallurgizdat, 1954. 104 p.
5. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoy deformatsii metallov i splavov. Spravochnik* [Plastic deformation resistance of metals and alloys. Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 488 p.
6. http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/30XGSA (accessed 1 December 2014).
7. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys under pressure treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 224 p.
8. Bankina O.S., Dzyuba A.C., Hvatan A.M. Metod postroeniya diagramm deformirovaniya « $\sigma - \epsilon$ » po spravochnym mekhanicheskim kharakteristikam materiala [Method for constructing stress-strain diagrams $\sigma - \epsilon$ using reference data on material's mechanical properties]. *Trudy TsAGI – Proceedings of Central Aerohydrodynamic Institute*, 2000, no. 2639, pp. 36-38.
9. Bruhn E.F. *Analysis and design of flight vehicle structures*. USA: Jacobs Publishing Inc. 650 p.
10. Salikhova N.K. Theory and Practice of Modern Science. *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference, 8-9 October 2014, Moscow, pp.102-109.*

Поступила в редакцию 01.12.2014; опубликована в электронном виде 30.12.2014

Сведения об авторах

Роговой Анатолий Алексеевич, дфмн, проф., зав. лаб., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: rogovoy@icmm.ru

Салихова Нелли Камилевна, кфмн, нс, ИМСС УрО РАН; e-mail: snk021@mail.ru