

**Н.К. Салихова**

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОСАДКИ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Рассматривается трехмерное численное моделирование напряженного и деформированного состояний заготовки из стали марки 30 ХГСА в процессе осадки и при разгрузке. Расчет осуществлен на базе конечно-элементного программного комплекса SIMULIA/Abaqus.

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением, операция осадки, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, заготовка из стали марки 30 ХГСА.

**N.K. Salikhova**

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

## **NUMERICAL MODELING OF STEEL WORKPIECE CONDITIONS TECHNOLOGY PROCESS**

Three-dimensional numerical modeling of the stress and deformed conditions of workpiece from steel of the brand 30 XGSA in process rainfall is considered and when unloading. Calculation is performed on the basis of a final and element program SIMULIA/Abaqus.

**Keywords:** processing of metals by pressure, operation rainfall, stress-strain state, numerical modeling, workpiece from steel of the brand 30 XGSA.

Обработкой давлением получают как слитки, так и уже готовые изделия и детали путем изменения формы и размеров заготовки за счет способности материала при определенных условиях пластически деформироваться. К числу технологических процессов обработки давлением относится операция осадки. Она может применяться в качестве основной для получения заданной формы изделия или предварительной операции для проработки структуры поковок. В некоторых случаях необходимо знание деформированного (по нему можно судить о степени проработанности структуры металла) и напряженного состояний заготовки.

В данной работе проводится трехмерное численное моделирование напряженно-деформированного состояния слитка массой 9300 кг из высококачественной легированной стали марки 30 ХГСА в процессе осадки и при разгрузке. Эскиз слитка изображен на рис. 1.

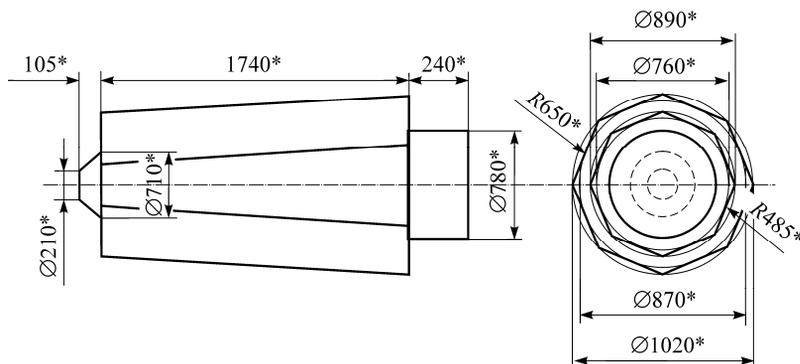


Рис. 1. Чертеж заготовки с нанесенными геометрическими размерами

Технологический процесс осадки стального слитка состоит из следующих основных этапов. Сначала заготовка помещается в печь и нагревается до температуры 500 °С. При этой же температуре в течение нескольких часов заготовка прогревается в печи до однородного состояния. Далее заготовка устанавливается вертикально и с помощью штампа осаживается с высоты (длины) 1740 мм до высоты 1230 мм, что соответствует деформации 29,3 %. При этом на поверхности контакта стальной заготовки с деформирующим инструментом (штампом) действуют силы трения, за счет которых возникает неравномерная (бочкообразная) деформация, порождающая в материале неоднородное напряженно-деформированное состояние [1, 2].

Исследование напряженно-деформированного состояния стальной заготовки при осадке проводилось с помощью конечно-элементного программного комплекса SIMULIA/Abaqus. В вычислительном эксперименте напряженно-деформированное состояние осаживаемой заготовки определялось с учетом геометрической (большие перемещения и деформации) и физической (нелинейное поведение материала) нелинейности.

Для численного моделирования в SIMULIA/Abaqus были заданы следующие условия. Температура нагрева стального слитка при-

нималась равной 500 °С [3, 4]. Деформирование слитка происходило в изотермических условиях. Механические характеристики заготовки соответствовали значениям для стали марки 30 ХГСА: модуль Юнга  $E = 173$  ГПа, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 640$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 690$  МПа, предел пропорциональности  $\sigma_{пр} = 608$  МПа, остаточное удлинение после разрыва  $\delta = 21\%$ . По этим механическим характеристикам стали с помощью нелинейного уравнения Рамберга-Осгуда [5, 6]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n,$$

$$n = \ln \left( \frac{\delta - \frac{\sigma_{пр}}{E}}{0,002} \right) / \ln \left( \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{0,2}} \right)$$

построена кривая деформирования, которая представлена на рис. 2.

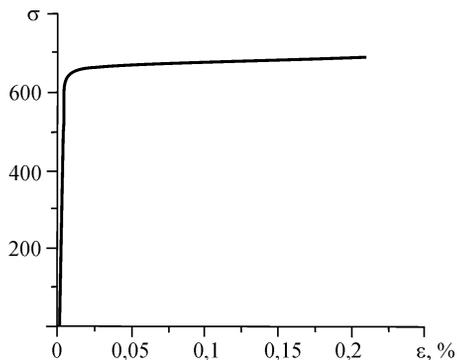


Рис. 2. Кривая деформирования стали 30ХГСА при 500 °С

Геометрия исследуемой области представлена на рис. 3, а.

Для построения равномерной конечно-элементной сетки использованы тетраэдральные элементы. Аппроксимация компонент вектора перемещений осуществлялась с помощью линейной функции формы. Вид конечно-элементной (дискретной) модели рассматриваемого тела приведен на рис. 3, б. Количество элементов в дискретной модели при расчетах принималось равным 275 125.

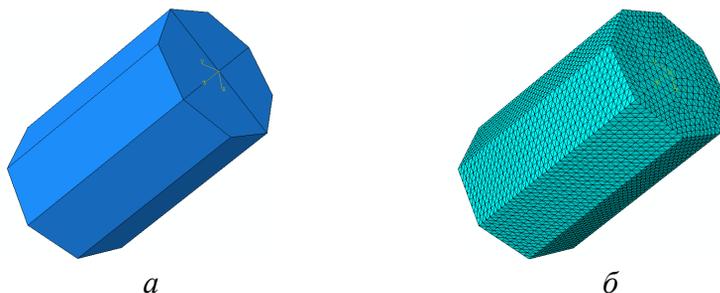


Рис. 3. Геометрия расчетной области (а) и конечно-элементная модель (б), построенные с помощью SIMULIA/Abaqus

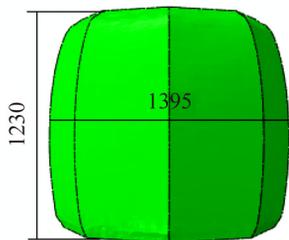


Рис. 4. Форма и размеры осаженой стальной заготовки

Нелинейная задача осадки заготовки решалась в перемещениях. Полагалось, что нижний торец заготовки жестко скреплен с недеформируемым основанием, а верхний торец осаживается на заданную величину 510 мм. В зонах контакта на верхней поверхности учтено условие прилипания для компонент вектора перемещений вдоль осей  $x$  и  $y$ . Формоизменение стального слитка после осадки представлено на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при деформации стальной заготовки на величину 29,3 % имеет место одинарное бочкообразование с выпуклой формой боковой поверхности.

На рис. 5 и 6 приведены результаты моделирования операции осадки в сечении слитка вертикальной плоскостью, проходящей через центральную его ось, и прилегающей к нему поверхности.

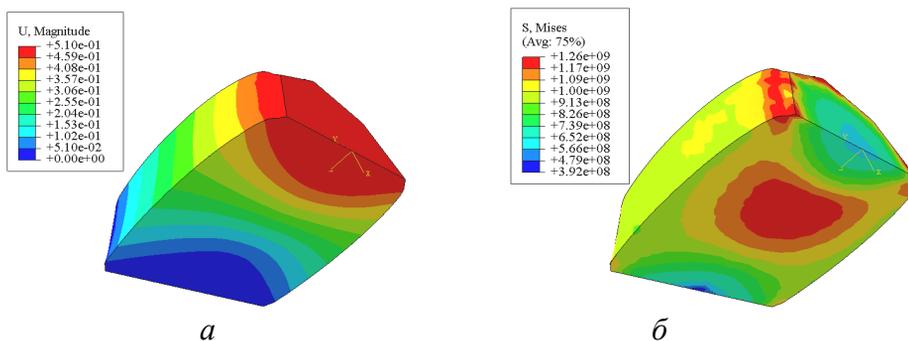


Рис. 5. Поле перемещений вдоль оси  $z$  (а) и распределение интенсивности напряжений (б) в сечении слитка и прилегающей к нему поверхности после осадки

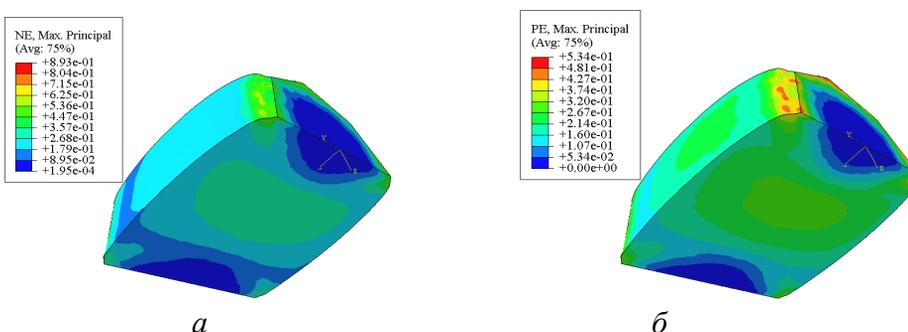


Рис. 6. Поля максимальных главных деформаций (а) и максимальных главных пластических деформаций (б) в сечении стального слитка и прилегающей к нему поверхности после операции осадки

Результаты вычислительного эксперимента после разгрузки (снятия ограничений, налагаемых при осадке) приведены на рис. 7, 8.

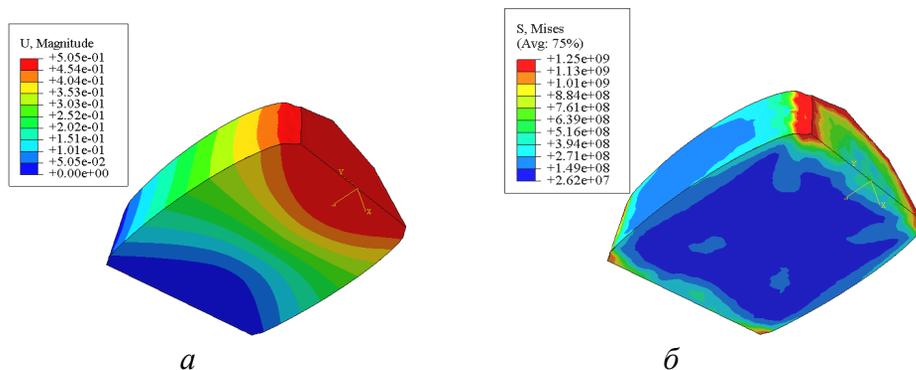


Рис. 7. Поле перемещений вдоль оси  $z$  (а) и распределение интенсивности напряжений (б) в сечении слитка и прилегающей к нему поверхности после разгрузки

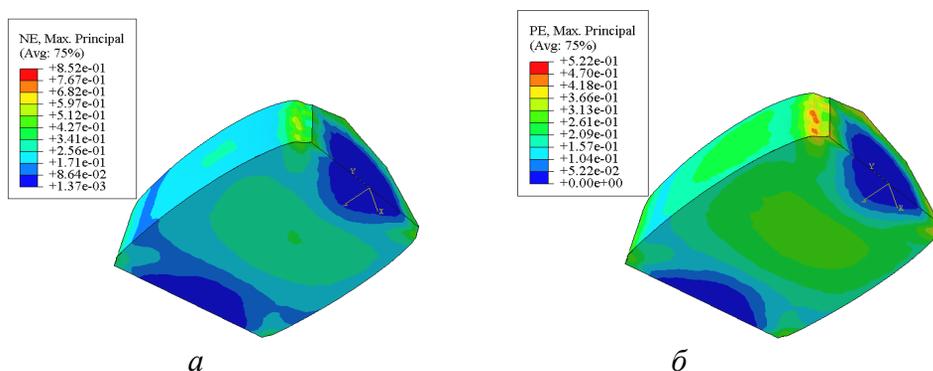


Рис. 8. Поля максимальных главных деформаций (а) и максимальных главных пластических деформаций (б) в сечении слитка и прилегающей к нему поверхности после разгрузки

На рис. 5–8 красному цвету соответствует максимальное значение вычисленных величин, а синему – минимальное. Из рис. 6, б и 8, б видно, что величина максимальной упругой деформации составляет десятые доли процентов по сравнению с максимальными пластическими деформациями.

С помощью серии численных экспериментов исследована сходимость и точность полученных результатов при различном разбиении расчетной области. На рис. 9 приведена зависимость изменения величины максимальной главной пластической деформации от числа элементов.

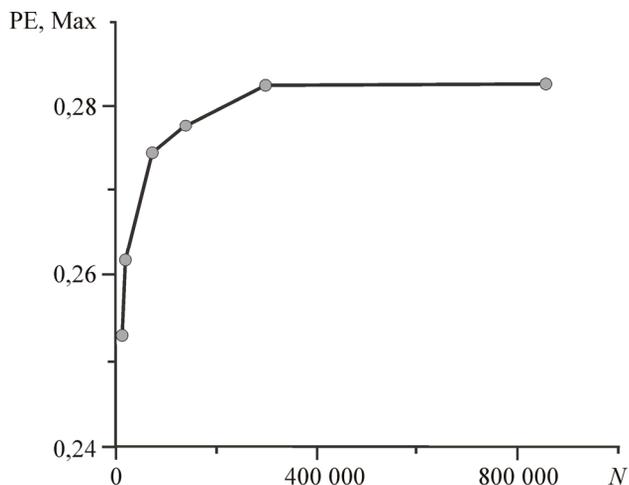


Рис. 9. Зависимость величины максимальной главной пластической деформации в центральной точке на оси от количества элементов

Установлено, что погрешность в вычислении максимальной главной пластической деформации, рассчитанной в центральной точке на оси области для 275 125 и 850 935 элементов, составляет около 0,01 %. Поэтому, с целью снижения времени компьютерного счета, результаты решения рассмотренных задач (см. рис. 5–8) приведены для 275 125 элементов. Кроме того, значение максимальной главной пластической деформации, вычисленной в центральной точке на оси расчетной области, становится неизменной и достигает значения 0,2826 (рис. 9).

*Автор статьи выражает благодарность С.Н. Лебедеву за помощь в использовании программного комплекса SIMULIA/Abaqus.*

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

### Библиографический список

1. Пластичность стали при высоких температурах / М.И. Зуев, В.С. Култыгин, М.И. Виноград [и др.]. – М.: Металлургиздат, 1954. – 104 с.

2. Обработка металлов давлением / И.М. Павлов, Н.М. Федосов, В.П. Северденко [и др.]. – М.: Metallurgizdat, 1955. – 484 с.
3. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справ. – М.: Metallurgiya, 1976. – 488 с.
4. Центральный металлический портал РФ. – URL: [http://metallicheskiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/30XGSA](http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stk/30XGSA) (дата обращения: 14.03.2014).
5. Банкаина О.С., Дзюба А.С., Хватан А.М. Метод построения диаграмм деформирования « $\sigma$ – $\epsilon$ » по справочным механическим характеристикам материала // Труды ЦАГИ. – 2000. – № 2639. – С. 36–38.
6. Bruhn E.F. Analysis and Design of Flight Vehicle Structures. – 1973.

### References

1. Zuev M.I., Kulygin V.S., Vinograd M.I. [et al.] Plastichnost' stali pri vysokikh temperaturakh [Plasticity of steel at high temperatures]. Moscow: Metallurgizdat, 1954. 104 p.
2. Pavlov I.M., Fedosov N.M., Severdenko V.P. [et al.] Obrabotka metallov davleniem [metal forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1955. 484 p.
3. Polukhin P.I., Gun G.Ia., Galkin A.M. Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov [Resistance of plastic deformation of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 488 p.
4. Tsentral'nyi metallicheskiy portal Rossiiskoi Federatsii [Central metal portal of Russian Federation], available at: [http://metallicheskiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/30XGSA](http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stk/30XGSA) (accessed 14 March 2014).
5. Bankina O.S., Dziuba A.C., Khvatan A.M. Metod postroeniia diagramm deformirovaniia « $\sigma$ – $\epsilon$ » po spravochnym mekhanicheskim kharakteristikam materiala [Method of creation of charts of deformation according to help mechanical characteristics of material]. *Trudy TsAGI*, 2000, no. 2639, pp. 36-38.
6. Bruhn E.F. Analysis and Design of Flight Vehicle Structures. 1973.

## **Об авторе**

**Салихова Нелли Камилевна** (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: snk021@mail.ru).

## **About the author**

**Nelli K. Salikhova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, Institute of Continuous Media Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (1, Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: snk021@mail.ru).