

УДК 539.5

А.А. Роговой, Н.К. Салихова

Институт механики сплошных сред Уральского отделения
Российской академии наук, Пермь, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ КРУПНОГО СЛИТКА

Приведены результаты численного моделирования технологического процесса обработки давлением крупного слитка из стали марки 30ХГСА. Моделирование соответствует технологической схеме, включающей охлаждение заготовки на воздухе при ее транспортировке от печи к деформирующему оборудованию и две формоизменяющие операции: свободную осадку и обжатие заготовки на круг до заданных размеров. Операция свободной осадки заготовки осуществляется между плоской верхней и кольцевой нижней плитами до диаметра 1060 мм, а процесс обжатия – между комбинированными бойками до заданного размера не менее 860 мм. Исследование пластического формоизменения, теплового и напряженно-деформированного состояний заготовки проведено на базе конечно-элементного программного продукта Deform-3D. Выполнен расчет усилия, необходимого для осуществления формоизменяющих операций при обработке давлением.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, Deform-3D, обработка давлением, напряженно-деформированное состояние, массивный стальной слиток, технологический процесс.

A.A. Rogovoi, N.K. Salikhova

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

MODELING OF TECHNOLOGICAL PLASTIC METAL HOT-FORMING OF A LARGE SIZE INGOT

The results of numerical modeling the technological process of plastic metal working of a large size ingot made of steel 30HGSA are presented. The modeling process has been carried out in accordance with a manufacturing scheme that involves the air cooling of the ingot during its transportation from the furnace to the deforming equipment, and two metal forming operations – free upsetting and open-die forging, during which the ingot is shaped into a circular configuration. The ingot was upset between the upper flat and lower annular dies to reach a diameter of 1060 mm. Then, using a combination of different dies the ingot was pressed to the desired dimensions no less than 860 mm. Examination of changes in the ingot shape and its heat and stress-strain states was carried out using an engineering software Deform-3D. A compression force required for implementation of forming operations during the technological process of plastic metal working was calculated.

Keywords: finite-element modeling, Deform-3D, plastic metal working, stress-strain state, massive steel ingot, technological process.

Введение

В работе с помощью программного продукта Deform-3D [1] проводится численное моделирование технологического процесса обработки давлением крупного слитка. Объект моделирования представляет собой слиток в виде восьмигранной усеченной пирамиды, с первоначальными геометрическими размерами, приведенными на рис. 1.

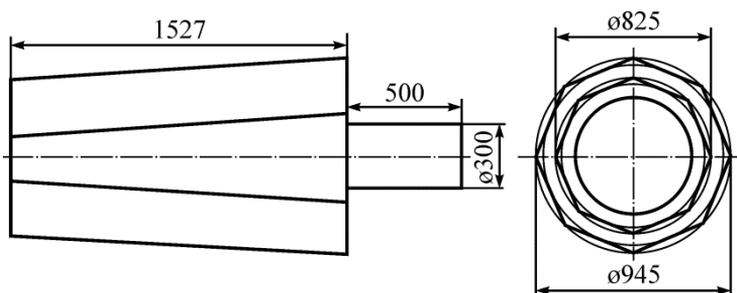


Рис. 1. Чертеж заготовки с нанесенными размерами, мм

Слиток изготовлен из высококачественной легированной стали марки 30ХГСА и имеет исходный вес 9300 кг.

1. Технология обработки давлением крупного слитка

Технологический процесс получения заготовки определенного размера пластической обработки давлением состоит из нескольких этапов. Сначала заготовка по заданному режиму нагревается в пламенной печи до однородной по всему сечению температуры 1200 °С. Затем в течение 45 с заготовка переносится на пресс, где она сжимается между плоскопараллельными плитами до диаметра 1060 мм. Далее происходит процесс обжатия слитка на круг до диаметра не менее 860 мм с помощью комбинированных бойков. Температурный интервал деформирования – 1200–900 °С. Формоизменение на всех этапах технологического процесса происходит при температуре окружающей среды 20 °С.

Для численного моделирования операций осадки и обжатия технологического процесса были построены в редакторе SolidWorks трехмерные модели заготовки и деформирующих инструментов. В расчетах механические и теплофизические свойства стали марки 30ХГСА при высоких температурах вычислялись с помощью справочной литературы [2–4].

2. Моделирование операции свободной осадки заготовки

В данном случае осадка применялась в качестве предварительной операции перед процессом обжатия для проработки материала с целью ликвидации литой структуры металла. В приведенной технологической схеме заготовка осаживалась до диаметра 1060 мм. Для получения этого размера (с учетом бочкообразования) были проведены вычислительные эксперименты рассматриваемого процесса при различной степени деформации и коэффициентах трения. Пластическое деформирование образца происходит при высоких температурах, поэтому трение рассматривалось в рамках модели Зибеля. В результате проведенных вычислений было установлено, что требуемый диаметр (1060 мм) поковка будет иметь в случае осевой деформации 32,5 % и коэффициенте трения $\mu = 0,3$.

Для осуществления операции свободной осадки в приведенной технологической схеме полагалось, что нижняя плита неподвижна, а верхняя – перемещается с высоты 1527 мм вдоль вертикальной оси z на 496 мм со скоростью 100 мм/с. Плиты имеют плоскую (верхняя) и кольцевую для установки хвостовика (нижняя) форму рабочей поверхности. Для уменьшения охлаждения торцов заготовки температура нагрева инструментов принималась равной 400 °С. Начальная температура заготовки для этого процесса определялась в результате решения термоупругих задач – нагрева заготовки в пламенной печи до однородной по всему объему температуры 1200 °С и последующего ее охлаждения на воздухе при ее транспортировке в течение 45 с до оборудования. Результаты моделирования операции осадки представлены на рис. 2–4. Наличие сил трения, действующих на поверхностях контакта между торцевыми поверхностями слитка и оборудованием, приводят к возникновению неоднородной деформации по объему поковки [5, 6], в результате чего заготовка будет иметь бочкообразную форму боковой поверхности. Изменение формы боковой поверхности и геометрические размеры заготовки в результате осадки иллюстрирует рис. 2. Из рис. 2, *a* видно, что по завершении операции осадки имеет место одинарное бочкообразование.

Кроме того, действие сил трения распространяется вглубь образца, создавая в нем зоны затрудненной деформации, находящиеся на поверхностях контакта заготовки и оборудования (рис. 3, *a*). Так, зона I

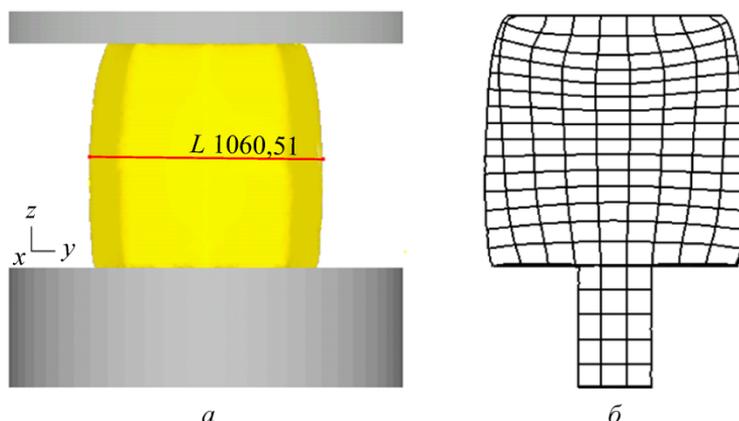


Рис. 2. Форма и размеры заготовки, осажённой между плоской и кольцевой плитами (мм) (а) до осевой деформации 32,5 % и координатная сетка (б) в конце операции свободной осадки (авторские результаты)

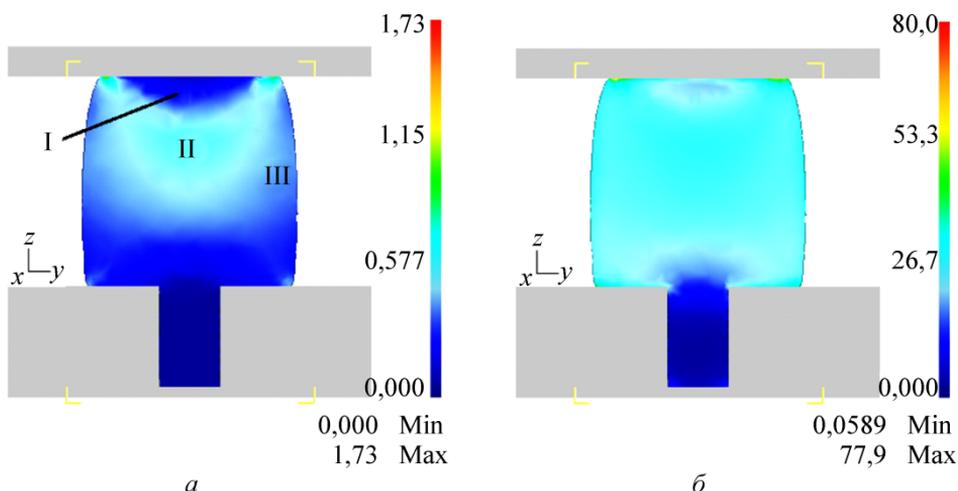


Рис. 3. Распределение интенсивностей деформаций (а) и напряжений (МПа) (б) в осевом сечении заготовки в конце процесса свободной осадки. Зоны деформации сжатого образца: I, III – затрудненные, II – интенсивная (авторские результаты)

в продольном сечении имеет куполообразную форму; величина накопленной интенсивности деформации здесь незначительная и составляет примерно 0,207. Зона II имеет крестообразную форму и характеризуется интенсивностью деформации порядка 0,588. В этой зоне возникают максимальные касательные напряжения. В области III интенсивность деформации составляет порядка 0,418. Эта зона подвергается растягивающим напряжениям со стороны зоны II. В процессе пластической об-

работки заготовка остывает за счет взаимодействия с более холодным инструментом и интенсивного теплообмена с окружающей средой – воздухом. В связи с этим при численном моделировании необходим контроль теплового состояния заготовки при осуществлении всех формообразующих операций. Распределение поля температур в сечении заготовки по завершении операции осадки приведено на рис. 4, а. Из него видно, что вблизи торцевых поверхностей слитка имеются охлажденные зоны, температура металла в которых достигает 867 °С. На боковой поверхности слитка температура металла – 1140 °С.

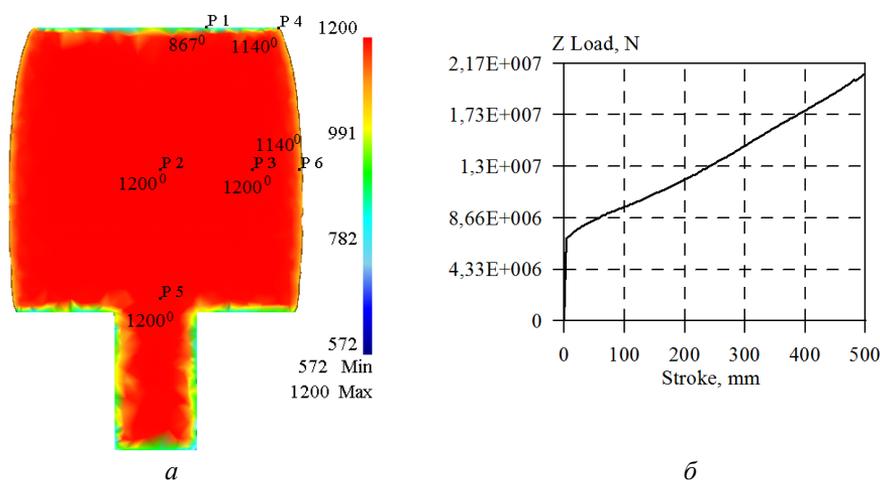


Рис. 4. Распределение поля температур (°С) (а) и усилие (Н) (б), необходимое для процесса осадки заготовки вдоль оси z (авторские результаты)

Усилие, необходимое для осуществления процесса осадки, является максимальным во всем приведенном технологическом процессе, поэтому если мощность пресса окажется достаточной для осуществления процесса осадки, то на этом оборудовании можно выполнять все последующие формоизменяющие операции. В программе Deform-3D было определено усилие, требуемое для осаживания заготовки до осевой деформации 32,5 % (рис. 4, б). Из графика видно, что это значение равно 20,6 МН.

3. Моделирование операции обжатия слитка

Следующим этапом (после осадки) в технологическом процессе является обжатие заготовки на круг диаметром не менее 860 мм. Деформирование слитка происходит с помощью комбинированных бойков: нижнего вырезного с величиной углового выреза 90° и плоского

верхнего, геометрические размеры которых показаны на рис. 5, а. Процесс обжатия осуществляется последовательным деформированием отдельных участков слитка с подачей его вдоль оси на величину 260 мм. После первого прохода по всей длине слиток поворачивается вокруг центральной оси на 90°, и процесс обжатия повторяется снова. Время контакта с инструментом при деформировании составляет 2 с. Бойки полагаются абсолютно твердыми телами и имеют постоянную температуру, равную 400 °С. Модель контактного взаимодействия слитка с оборудованием принимается в рамках закона Зибеля с коэффициентом трения, равным 0,4, что соответствует обжатию на сухих бойках. Распределение поля температур, полученное по окончании процесса свободной осадки, принято в качестве начального для операции обжатия. Результаты численного моделирования процесса обжатия заготовки на круг до диаметра не менее 860 мм, соответствующие концу операции (после всех проходов), приведены на рис. 5, б.

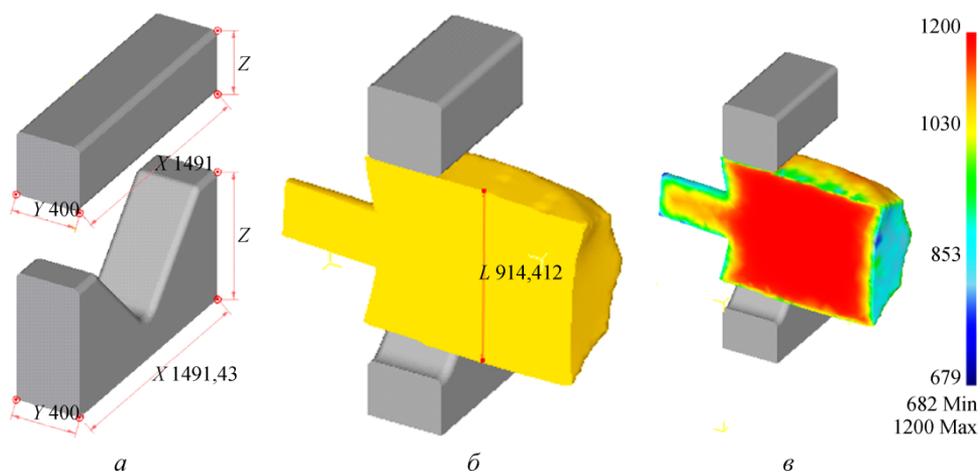


Рис. 5. Верхний плоский и нижний вырезной бойки для процесса обжатия (а); форма и размеры заготовки (мм) в конце операции обжатия (б); распределение температурного поля (°С) в сечении заготовки и на прилегающих к нему поверхностях в конце четвертого прохода (в) (авторские результаты)

Результаты вычислений распределения температурного поля показаны на рис. 5, в. Из него видно, что по завершении процесса обжатия температура на боковой поверхности и в сечении заготовки становится неоднородной. Кроме того, на боковой поверхности имеются охлажденные зоны, минимальная температура в которых на боковой поверхности

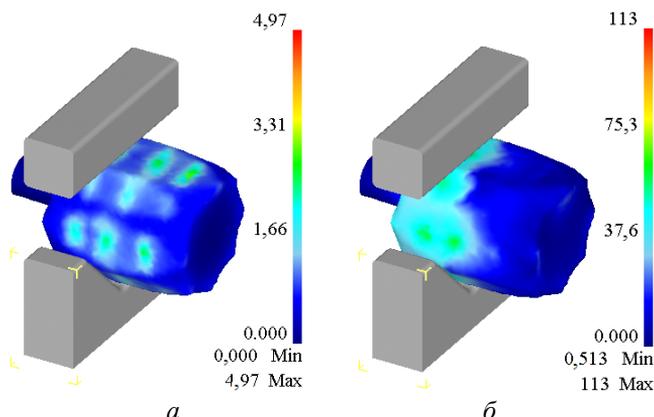


Рис. 6. Распределение интенсивностей деформаций (а) и напряжений (МПа) (б) по завершении операции обжатия (авторские результаты)

достигает значения 884 °С. Рис. 6 иллюстрирует неравномерность деформаций и напряжений на контактных поверхностях инструмента и заготовки по завершении операции обжатия.

Заключение

В работе с помощью программного продукта Deform-3D выполнено моделирование реального технологического процесса деформирования крупного стального слитка. Выявлены зоны затрудненной деформации в слитке по завершении формоизменяющих операций. Изучено тепловое состояние заготовки на всех этапах деформирования. Определено усилие, требуемое для осуществления пластической обработки давлением крупного слитка.

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).

Список литературы

1. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D: учеб. пособие / В.С. Паршин [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та, 2010. – 266 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

3. Пластичность стали при высоких температурах / М.И. Зуев [и др.]. – М.: Metallurgizdat, 1954. – 104 с.
4. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – 2-е изд. – М.: Metallurgiya, 1973. – 224 с.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Metallurgiya, 1986. – 688 с.
6. Обработка металлов давлением / И.М. Павлов [и др.]; под науч. ред. И.М. Павлова. – М.: Metallurgizdat, 1955. – 484 с.

References

1. Parshin V.S. [et al.] Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu Deform-3D [Practical guidance for application of the Deform-3D software package]. Ekaterinburg, 2010. 266 p.
2. Sorokin V.G. [et al.] Marochnik stalei i splavov [Steel grade guide]. Moscow, 1989. 640 p.
3. Zuev M.I. [et al.] Plastichnost' stali pri vysokikh temperaturakh [Steel plasticity at high temperatures]. Moscow, 1954. 104 p.
4. Tret'iakov A.V., Ziuzin V.I. Mekhanicheskie svoistva metallov i splavov pri obrabotke davleniem [Mechanical properties of metals and alloys in plastic metal working]. Moscow, 1973. 224 p.
5. Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics of plastic metal working]. Moscow, 1986. 688 p.
6. Pavlov I.M. [et al.] Obrabotka metallov davleniem [Plastic metal working]. Moscow, 1955. 484 p.

Получено 05.12.2015

Об авторах

Роговой Анатолий Алексеевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: rogovoy@icmm.ru).

Салихова Нелли Камилевна (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплош-

ных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: salikhova@icmm.ru).

About the authors

Anatolii A. Rogovoi (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Laboratory of Nonlinear Mechanics of Solids, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: rogovoy@icmm.ru).

Nelli K. Salikhova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Physics and Mathematics, Research Fellow of the Laboratory of Nonlinear Mechanics of Solids, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: salikhova@icmm.ru).