

УДК 621.73

**Т.Е. Мельникова, Ю.А. Казаринова**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ**

Представлено моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки в программном комплексе QForm 2D/3D. Численный эксперимент позволил определить рациональные технологические параметры процесса и оценить устойчивость формы заготовки при деформировании с целью получения качественных изделий. Исследованы особенности процесса деформирования при осадке заготовок, связанные с физическими характеристиками материала, масштабным фактором заготовок, видами оборудования и технологическими параметрами процесса. Полученные результаты могут быть использованы при решении технологических задач, связанных с совершенствованием процессов производства изделий с целью повышения уровня автоматизации производства и качества готовых изделий, снижения себестоимости их производства.

**Ключевые слова:** численное моделирование, пластическая деформация, осадка, напряженное состояние, рациональная технология, устойчивость, качество.

**T.E. Mel'nikova, Ju.A. Kazarinova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **MODELING OF UPSETTING PROCESS OF A CYLINDRICAL WORKPIECE**

The modeling of upsetting process of a cylindrical workpiece in the software package QForm 2D/3D presented. Numerical experiment allowed us to determine the rational technological parameters of the process and to assess the stability of the shape of the workpiece during the deformation with the aim of obtaining quality products. The features of the process of deformation at a deposit of the workpieces were investigate, related to the physical characteristics of the material, a scale factor types of equipment and technological parameters of the process. The obtained results can be used to solve technological problems related to the improvement of processes of production with the aim of increasing automation of production and quality of finished products, reduce the cost of their production.

**Keywords:** numerical modeling, plastic deformation, upsetting, stress state, rational technology, stability, quality.

Основой многих прогрессивных ресурсосберегающих технологий является обработка металлов давлением, среди известных методов которой наиболее эффективным является осадка, позволяющая значительно экономить материал при производстве поковок [1–6]. Повыше-

ние эффективности технологии обработки металлов давлением является актуальной задачей. С точки зрения экономичности при разработке оптимальной технологии обработки металлов давлением преимущество имеет программная реализация численных методов [7].

Задачи производства, связанные с минимизацией затрат на освоение и отладку новых технологий, усовершенствование и оптимизацию форм рабочего инструмента и заготовки, успешно решаются путем применения математического моделирования процессов обработки металлов давлением.

В этом отношении большое значение имеет реализация численных экспериментов процесса осадки в программном пакете QForm 2D/3D, который является комплексом инженерингового программного обеспечения для разработки, анализа и оптимизации технологий обработки металлов давлением. Данный пакет разработан компанией ООО «КванторФорм». Суть моделирования при этом заключается в дискретизации объема заготовки и многократной автоматической перестройке сетки конечно-элементной расчетной модели с учетом краевых условий, при этом обеспечивается необходимая точность решения пластических задач.

Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния цилиндрической заготовки при осадке путем проведения численного эксперимента с применением конечно-элементного анализа в программном комплексе QForm 2D/3D. При этом проведен анализ напряженно-деформированного состояния цилиндрической заготовки при осадке с учетом различных конфигураций прессового инструмента, масштабного фактора заготовки и технологических параметров осадки (температуры деформирования, скорости деформирования, условий трения между прессовым инструментом и заготовкой, уровня осадки, физико-механических характеристик материала заготовки).

Рассмотрена задача пластического деформирования при осадке заготовки в осесимметричной постановке, основанной на разрешающих уравнениях, полученных на основе принципа минимума полной потенциальной энергии для системы перемещений, реализуемой в деформированной заготовке, с учетом граничных условий на ее поверхности [2, 3, 6].

В модели учтена полная система дифференциальных уравнений теории пластичности [2–6]:

$$\sigma_{i,j} = 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{(u_{i,j} + u_{j,i})}{2}, \quad (2)$$

$$T = T(\Gamma), \quad \sigma = \sigma(\varepsilon), \quad (3)$$

где  $\sigma_{i,j}$ ,  $\varepsilon_{i,j}$  – компоненты тензора напряжений и деформаций соответственно;  $u_{i,j}$  – компоненты вектора перемещений;  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $\Gamma$  – интенсивность деформаций сдвига.

Система уравнений (1)–(3) включает дифференциальные уравнения движения, которые при условии малости удельных массовых сил и ускорений движения частиц тела имеют вид (1), кинематические соотношения для малых деформаций (2), физические уравнения (3). Решена система уравнений (1)–(3) с учетом граничных условий в перемещениях и напряжениях на соответствующих поверхностях модели с применением метода конечных элементов.

Была создана математическая модель процесса осадки как сплошной, так и полый цилиндрической заготовки с учетом реальных свойств материала и конкретных условий деформирования, исследовано напряженно-деформированное состояние осаживаемых заготовок, проведен анализ полученных результатов.

Были осуществлены следующие численные эксперименты: осадка сплошной и полый цилиндрической заготовки, выполненной из стали (Ст45) и алюминия. В качестве инструментов были выбраны механический пресс 80 МН и молот 23 т. Расчеты проводились с учетом осадки с деформацией от 10 до 75 %, режим трения определялся выбором вида смазки из базы данных пакета QForm – либо отсутствие смазки, либо идеальная смазка (графит + вода).

Был исследован процесс осадки цилиндрических заготовок разных видов:

- а) между параллельными плоскими плитами;
- б) между параллельными плоскими плитами с отверстием в основании;
- в) между параллельными плоскими плитами с двумя отверстиями.

Численный эксперимент процесса осадки цилиндрических заготовок позволил проанализировать возникающие напряженные состояния при деформировании с применением различных видов оборудования, учета сопротивления деформации разных материалов, масштабного фактора и разных условий трения. Например, на рис. 1 представлено распределение среднего напряжения по сечению осаживаемой без смазки сплошной цилиндрической заготовки, выполненной из стали 45.

Полученные при численном эксперименте результаты, подобные тем, что изображены на рис. 1, хорошо согласуются с экспериментальными данными, которые известны из научной литературы [2, 4, 6], и подтверждают теоретические основы, описывающие особенности процесса деформирования при осадке сплошной и полый цилиндрической заготовки.

Одним из многих проведенных численных экспериментов является расчет напряжений при решении задачи об устойчивости формы заготовки.

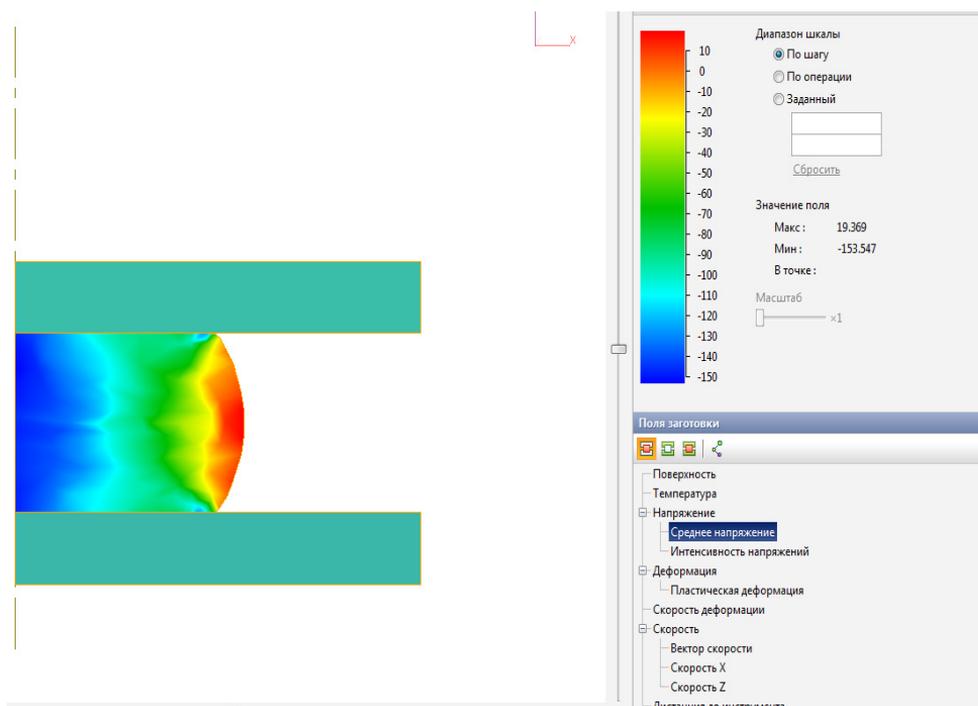


Рис. 1. Анализ напряженного состояния сплошной цилиндрической стальной заготовки, осаживаемой без применения смазки между плоскопараллельными плитами пресса

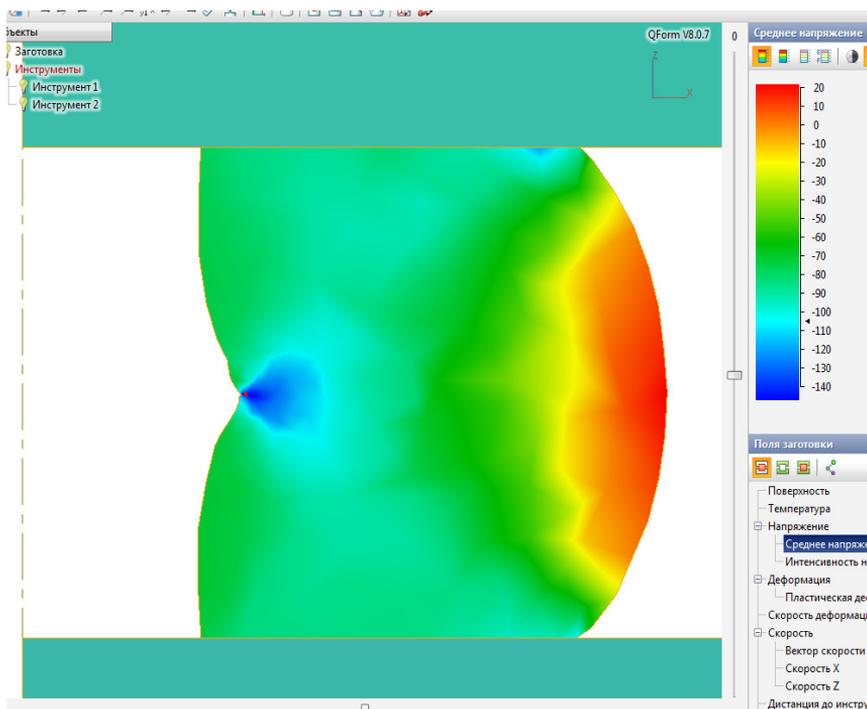


Рис. 2. Деформирование полой цилиндрической заготовки при осадке без смазки

Основным дефектом осадки полых (кольцевых) заготовок является потеря устойчивости формы вследствие тонкостенности заготовки. На рис. 2 представлено распределение среднего напряжения по сечению полой заготовки при потере устойчивости формы (расчет был проведен для осадки без смазки).

На рис. 2 видно, что потеря устойчивости формы полой заготовки сопровождается неравномерным распределением напряжений по сечению заготовки и искажением внутренней и внешней поверхности заготовки. Это связано с характером двустороннего радиального течения металла при осадке полой заготовки. На внешней поверхности наблюдается явно выраженная выпуклость, а на внутренней поверхности образуются складки смятия поверхности. Анализ параметров осадки позволяет выбрать такие режимы деформирования, при которых будет сохраняться устойчивость ее формы.

Таким образом, моделирование технологического процесса осадки цилиндрической заготовки в программном пакете QForm 2D/3D позволяет решать задачи рационального выбора технологических пара-

метров с целью получения качественного изделия. Полученные результаты могут быть полезны предприятиям машиностроительной промышленности, заинтересованным в совершенствовании технологических процессов обработки металлов давлением с целью повышения уровня автоматизации производства и качества готовых изделий, снижения себестоимости их производства.

### **Список литературы**

1. Килов А.С. Обработка материалов давлением в промышленности / Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург, 2003. – 266 с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
3. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1979. – 119 с.
4. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением / П.И. Полухин, В.К. Воронцов, А.Е. Кудрин [и др.]. – М.: Металлургия, 1974. – 336 с.
5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
6. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго [и др.]. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
7. Боровик П.В., Усатюк Д.А. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением / Дон. гос. техн. ун-т. – Алчевск, 2011. – 299 с.

### **References**

1. Kilov A.S. Obrabotka materialov davleniem v promyshlennosti [Processing of materials pressure in the industry]. Orenburg, 2003. 266 p.
2. Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics of processing of metals pressure]. Ekaterinburg, 2001. 836 p.
3. Malinin N.N. Tekhnologicheskie zadachi plastichnosti i polzuchesti [Technological tasks plasticity and creep]. Moscow, 1979. 119 p.
4. Polukhin P.I., Vorontsov V.K., Kudrin A.E. [et al.]. Deformatsii i napriazheniia pri obrabotke metallov davleniem [Deformations and tension at processing metals pressure]. Moscow, 1974. 336 p.
5. Storozhev M.V., Popov E.A. Teoriia obrabotki metallov davleniem [Theory of processing of metals pressure]. Moscow, 1977. 423 p.

6. Tarnovskii I.Ia., Pozdeev A.A., Ganago O.A. [et al.]. Teoriia obrabotki metallov davleniem [Theory of processing of metals pressure]. Moscow, 1963. 672 p.

7. Borovik P.V., Usatiuk D.A. Novye podkhody k matematicheskomu modelirovaniu tekhnologicheskikh protsessov obrabotki davleniem [New approaches to mathematical modeling of technological processing pressure]. Alchevsk, 2011. 299 p.

Получено 16.08.2016

### **Об авторах**

**Мельникова Татьяна Евгеньевна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

**Казаринова Юлия Александровна** (Пермь, Россия) – бакалавр, факультет прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: monic17@mail.ru).

### **About the authors**

**Tat'iana E. Mel'nikova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).

**Iuliia A. Kazarinova** (Perm, Russian Federation) – Bachelor, Applied Mathematics and Mechanics Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: monic17@mail.ru).