

Численное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей из листовых заготовок методом вытяжки пластичным металлом

© М.А. Бабурин¹, В.И. Колпаков¹, А.С. Вышегородцева¹,
С.Г. Муляр²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ПАО «РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Проанализированы закономерности формообразования оболочечных деталей пластичной средой. С целью уменьшения времени на экспериментальную отработку технологического процесса проведено численное моделирование процесса листовой штамповки пластичным металлом в жесткие матрицы осесимметричных деталей летательных аппаратов. Исследование выполнено с помощью модулей программного комплекса ANSYS для решения нестационарных и динамических задач. Приведены результаты математического моделирования процесса штамповки заготовки с применением пластичного металла для различных значений скоростей деформаций и коэффициента трения между матрицей и заготовкой.

Ключевые слова: численное моделирование, штамповка, пуансон, деформация материала заготовки, вытяжка пластичным металлом

Одна из важных проблем машиностроительного производства — получение качественных тонкостенных оболочечных деталей. Глубокая вытяжка является одним из эффективных средств получения прогрессивных заготовок под механическую обработку. Однако единичный и мелкосерийный многономенклатурный характер производства деталей летательных аппаратов накладывает определенные ограничения на традиционные процессы штамповки. Штамповка-вытяжка представляет собой процесс сложного нагружения при непрерывно меняющемся напряженно-деформированном состоянии.

Особый интерес представляет процесс штамповки пластичным металлом в жесткие матрицы, обладающий рядом сопутствующих благоприятных факторов, которые обеспечивают втягивание заготовки в матрицу. При изготовлении деталей в этом случае требуется только один сменный инструмент — вытяжная матрица, поскольку роль пуансона выполняет свинец. Этот металл способен восстанавливать свои свойства при комнатной температуре, что практически невозможно при использовании резины и полиуретана в качестве универсальных сред. При штамповке полиуретаном в нем возникают остаточные деформации, что приводит к неизбежной замене этого материала.

Сущность процесса формообразования оболочечных деталей пластичной средой (например, свинцом) состоит в том, что листовая заготовка 1 (рис. 1) устанавливается на матрицу 2. При рабочем ходе пресс-контейнер 4 с пластичной средой 3 опускается вниз, и заготовка 1 вместе с матрицей 2 вдавливается в пластичный металл, который вместе с заготовкой течет в рабочую полость матрицы 2. В результате происходит свертка заготовки в полое изделие 5. По окончании вытяжки пластичный металл, принявший форму внутренней полости жесткой металлической матрицы 2, обжимается плоским разглаживающим пуансоном 6.

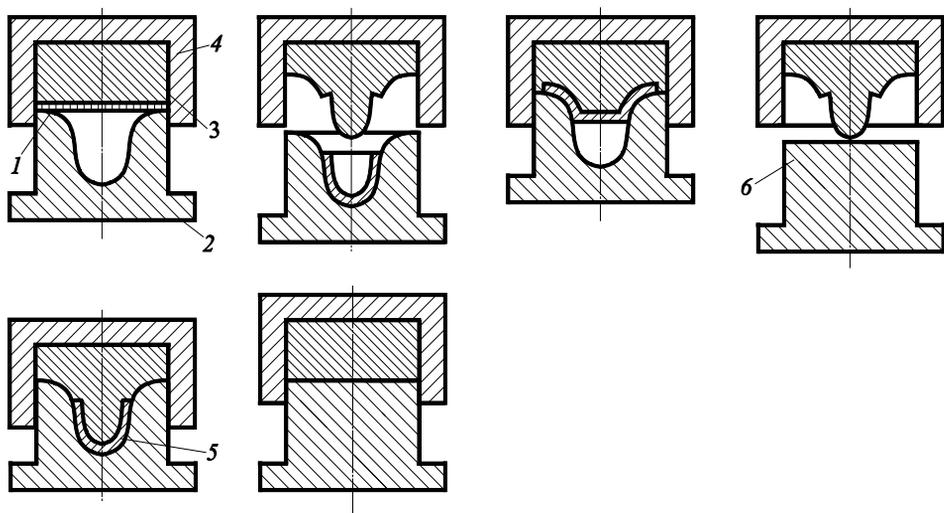


Рис. 1. Схема процесса формообразования оболочечных деталей пластичной средой:

1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — пластичная среда; 4 — пресс-контейнер; 5 — изделие; 6 — плоский разглаживающий пуансон

Цель настоящей работы — проанализировать закономерности описанного выше процесса как интегральной совокупности факторов, действующих на заготовку, с применением аппарата численных методов механики сплошной среды. Расчетная схема задачи и основные компоненты модели показаны на рис. 2.

Будем полагать, что штамповка осуществляется путем движения пресс-контейнера с заданной скоростью V . Пресс-контейнер передает усилие на деформируемую пластичную среду (свинец), оказывающую давление на заготовку из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 3 мм. Во время деформации заготовка постепенно принимает форму внутренней поверхности матрицы. Матрица и пресс-контейнер приняты абсолютно жесткими. К ним применимы соответствующие граничные условия: перемещения всех узлов конечно-элементной модели матрицы равны нулю, а начальная скорость узлов модели пресс-контейнера

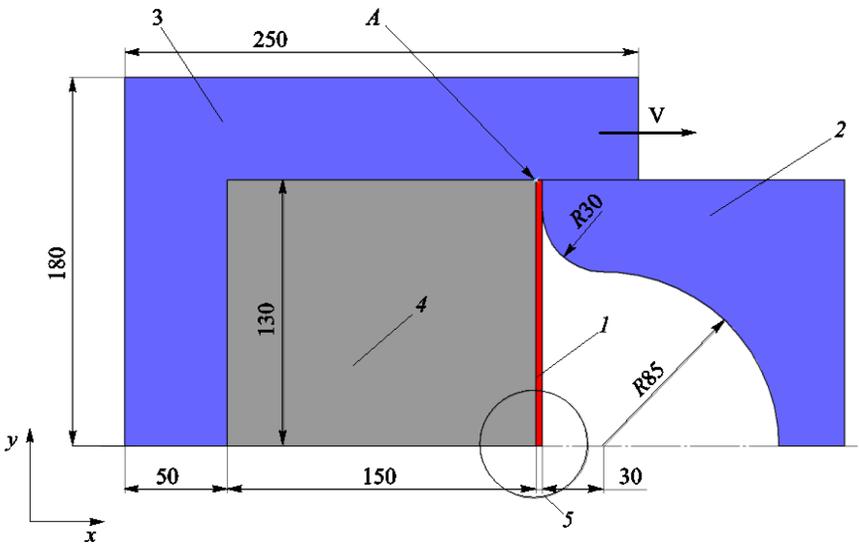


Рис. 2. Расчетная схема:

1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — пресс-контейнер; 4 — пластичная среда; 5 — область профилирования пластичной среды; V — вектор скорости контейнера; A — реперная точка

постоянна и равна $V_x = V$, $V_y = 0$. Кроме того, между матрицей и заготовкой введен коэффициент трения скольжения, числовые значения которого изменялись в диапазоне $0 \dots 0,25$. Конкретные расчеты проводились для скоростей движения пуансона $5 \dots 100$ мм/с, 1 м/с и 10 м/с в двумерной осесимметричной постановке. Решение осуществлялось с помощью программного комплекса ANSYS (модули Transient Structural и Autodyn для нестационарных и динамических задач соответственно).

Пластичная среда (см. рис. 2) представляет собой цилиндрическое тело. Для анализа влияния профиля пластичного металла на динамику развития процесса штамповки и конечную форму получаемой детали в свинце над заготовкой была задана полость разных размеров и конфигурации (рис. 3). Реперная точка в расчетной модели использовалась для сравнительного анализа перемещения заготовки вдоль оси абсцисс в разных условиях.

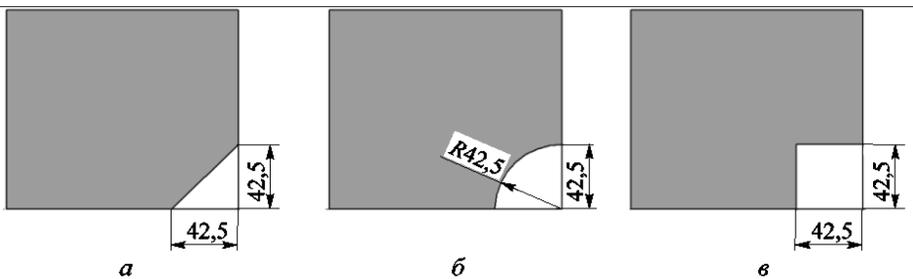


Рис. 3. Профиль полости в пластичной среде в области контакта с заготовкой:
 а — конический; б — сферический; в — цилиндрический

Отметим, что при анализе низкоскоростной штамповки (до 100 мм/с) в качестве модели упругопластического течения материалов пластичной среды (свинца) и заготовки (сплав АМгб) была использована модель билинейного кинематического упрочнения, в которой определяющими параметрами являются не только значения модуля сдвига и предела текучести материала, но и величина изотропного упрочнения (тангенс угла наклона участка пластического деформирования за пределом текучести). При более высоких скоростях штамповки для обеих указанных сред использовалась модель сжимаемой идеальной упругопластической среды, в которой вместо статических значений предела текучести σ_T применялись его динамические значения Y , а в качестве уравнения состояния среды — баротропная зависимость вида

$$p = K(\rho/\rho_0 - 1),$$

где K — модуль объемного сжатия; ρ , ρ_0 — текущая и начальная плотность среды.

Причем для установления однозначной взаимосвязи между модулем Юнга E , модулем сдвига (или вторым параметром Ламе) G и модулем объемного сжатия K использовались соотношения

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

где ν — коэффициент Пуассона.

В представленном исследовании использованы физико-механические параметры для алюминиевого сплава АМгб и свинца, представленные в таблице [1–3].

**Числовые значения физико-механических параметров
для свинца и алюминиевого сплава АМгб**

Характеристика	АМгб	Свинец
ρ_0 , г/см ³	2,64	11,34
σ_T , ГПа	0,15–0,17	0,02–0,03
Y , ГПа	0,35	0,02–0,03
ν	0,31	0,45
E , ГПа	69	14
E_1 , ГПа	69	14
E_2 , ГПа	0,50	0,05
K , ГПа	60,50	46,70
G , ГПа	26,30	4,80

Примечание. E_1 , E_2 — модули Юнга в области упругости и пластичности для билинейной модели изотропного упрочнения.

Для низкоскоростной штамповки решение задачи производилось методом конечных элементов [4–7], реализующим принцип виртуальных перемещений. В этом случае в качестве переменных выступают перемещения узлов конечных элементов, а в качестве основных разрешающих уравнений — уравнения движения упругого тела, записанные в перемещениях и называемые также уравнениями Ламе [8]:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x_i} (\nabla_j u^j) + G \nabla_{ij}^2 u^i + F_i = 0.$$

Здесь u_i — компоненты вектора перемещений; t — время;

$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$; F_i — интенсивность приложенной нагрузки; i ,

$j = x, \theta, y$. Уравнения Ламе получены в предположении $\rho = \text{const}$ и при условии выполнения закона Гука

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda I_1(\varepsilon),$$

где σ_{ij} , ε_{ij} — компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно; $I_1(\varepsilon)$ — первый инвариант тензора деформаций; ε — средняя деформация. Причем

$$I_1(\varepsilon) = \nabla_j u^j, \quad \varepsilon_{ij} = 0,5(\nabla_j u_i + \nabla_i u_j) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right).$$

В качестве граничных использовалась следующая группа условий: на контактных границах $(u_i^{(1)} - u_k^{(2)})n_i = 0$, $F_i = \mu F_{ni}$ ($u_i^{(1)}$, $u_k^{(2)}$ — массовые скорости в узлах контактирующих тел; n_i — составляющие вектора нормали в узлах контактирующих поверхностей; F_i , F_{ni} — касательные и нормальные составляющие сил трения; μ — коэффициент трения скольжения, равный 0..0,25); на свободных границах $\sigma_{ij}n_i = 0$; на оси симметрии $u_y = 0$, $du_y / dt = 0$, $\sigma_{xy} = 0$.

В процессе исследования поставленной задачи было установлено, что при низких начальных скоростях пресс-контейнера (до 100 мм/с) и неизменных числовых значениях коэффициента трения характер деформирования заготовки менялся незначительно. По этой причине в качестве «базового» варианта для этого случая был выбран вариант штамповки с начальной скоростью $V = 20$ мм/с.

В качестве примера показан характер изменения формы и динамика развития напряженного состояния в реперных точках алюминиевой заготовки в процессе штамповки пластичным металлом без выреза (рис. 4, *справа*). Коэффициент трения скольжения между заготовкой и матрицей в этом случае задавался равным 0,25. Аналогичный процесс штамповки с использованием профилированной среды (см. рис. 3, *а*) показан на рис. 4, *слева*.

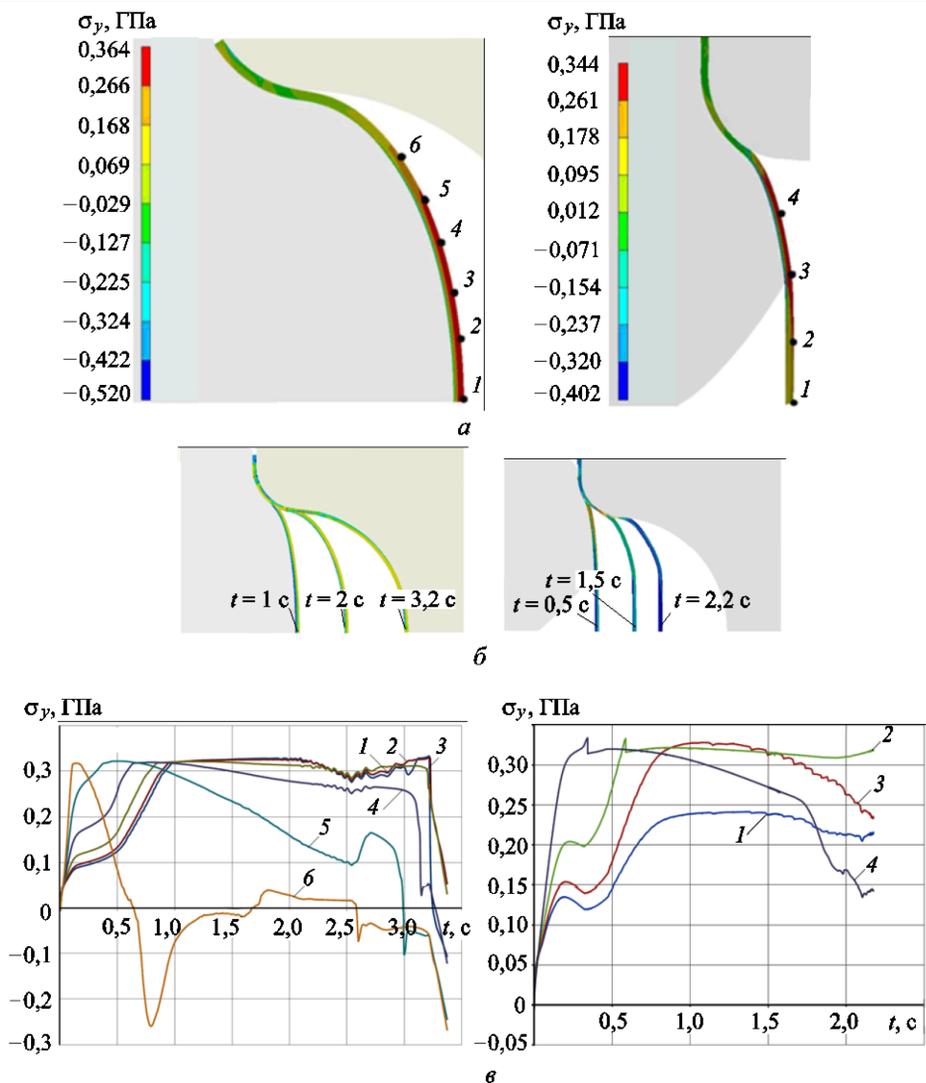


Рис. 4. Характер деформирования заготовок при штамповке пластичной средой (слева) с коническим вырезом и (справа) без выреза:

а — месторасположение реперных точек (обозначены цифрами); *б* — профиль заготовки в разные моменты времени; *в* — расчетные зависимости изменения радиальных напряжений σ_r в реперных точках заготовки

По данным рис. 4 можно заключить, что значительное растягивающее усилие приводит к местному утонению и последующему разрыву заготовки. Аналогичные результаты получены и при использовании вырезов сферической и конической формы. При этом изменение значений коэффициента трения скольжения не оказало заметного влияния на результат штамповки.

В ходе решения задачи также исследовано влияние числовых значений коэффициента трения скольжения на положение реперной точки *A* при штамповке пластичной средой без выреза. Результат представлен на рис. 5.

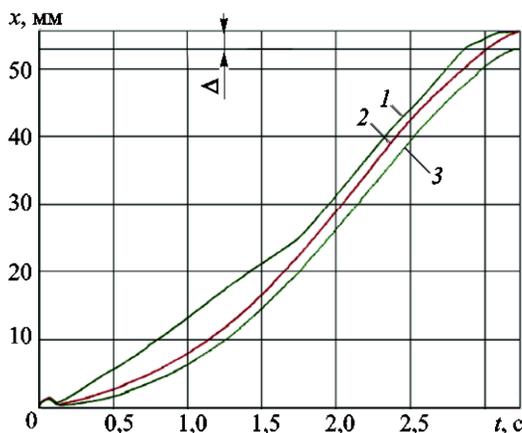


Рис. 5. Зависимости перемещения вдоль оси абсцисс (ось x) реперной точки A , полученные расчетным путем при штамповке пластичным металлом без выреза при коэффициенте трения скольжения μ , равном:
 1 — 0; 2 — 0,15; 3 — 0,25

Согласно данным на представленном графике, в случае когда $\mu = 0,25$, точка проходит меньшее расстояние (кривая 3), чем при μ , равном 0 и 0,15 (кривые 1 и 2 соответственно). При этом разница между значениями кривых 1 и 3 на момент полной остановки заготовки составила $\Delta = 2$ мм. Таким образом, чем выше коэффициент трения скольжения и меньше расстояние, пройденное точкой A , тем большую пластическую деформацию будет испытывать материал заготовки.

При численном моделировании высокоскоростной штамповки ($V > 1$ м/с) учитывалась не только прочность, но и сжимаемость твердой среды. В этом случае, как правило, используются модели упруго-пластической и идеальной упругопластической сред [9], которые базируются на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии и включают в себя кинематические и физические соотношения. При этом есть основания задачи высокоскоростного деформирования, связанные с распространением волн в твердой среде (ударных волн, волн разрежения и напряжений), рассматривать в адиабатическом приближении, пренебрегая достаточно медленным процессом теплообмена частиц среды между собой. Как правило, при изучении подобных процессов, связанных с возникновением интенсивных полей напряжений, пренебрегают действием внешних объемных сил, например силы тяжести. Результаты решения задачи для этого случая представлены на рис. 6.

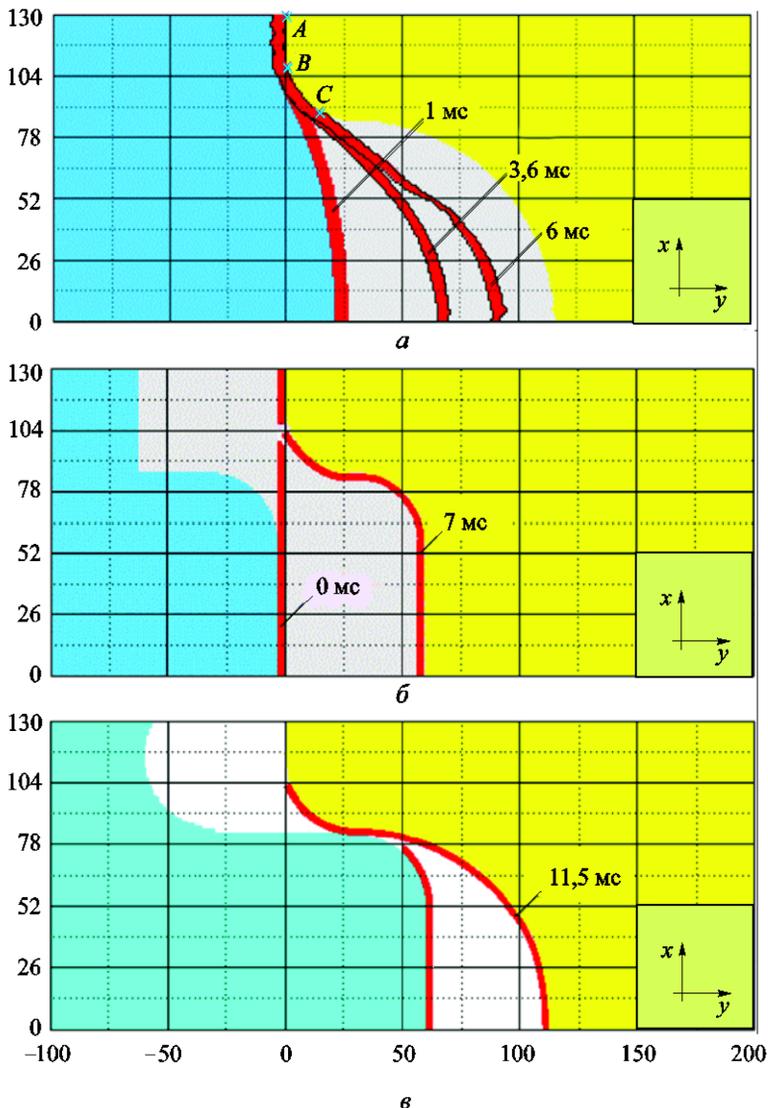


Рис. 6. Характер деформирования заготовок при высокоскоростной штамповке ($V = 10$ м/с) пластичной средой: *а* — стадии процесса штамповки детали с высоким прогибом; *б* — форма промежуточной матрицы; *в* — профилирование пластичной среды для уменьшения трения между заготовкой и матрицей

Как видно, с увеличением начальной скорости движения пресс-контейнера, перемещающегося вместе с пластичным наполнителем, характер формоизменения заготовки существенно меняется. В этом случае за счет практически жесткого сцепления периферийной части заготовки с поверхностью матрицы (участок *ABC* на рис. 6, *а*) в области заготовки, свободной от действия сил трения, развиваются сильные пластические деформации. В результате при штамповке деталей с высоким прогибом (отношением $H/D > 0,2 \dots 0,5$, где H — высота детали, D — наружный диаметр основания детали) они, как правило,

разрушаются посредством перетяжки по слабому сечению. Схематично отдельные стадии такого процесса показаны на рис. 6, а (также указано время окончания соответствующей стадии в миллисекундах). В момент времени 6 мс (см. рис. 6, а) расчет заканчивался, так как становилось понятно, что в процессе последующего движения заготовка разрушится.

При использовании деталей с невысоким прогибом ($H/D < 0,2$) скорость движения пресс-контейнера, наполненного пластичной средой, и интенсивность трения между заготовкой и матрицей уже не оказывают существенного влияния на разнотолщинность и конечную форму получаемой детали из разных материалов, включая труднодеформируемые сплавы, что подтверждает наличие возможности использовать для этих целей широкую номенклатуру кузнечно-прессового оборудования. В принципе высокоскоростную штамповку можно использовать и для получения деталей с высоким прогибом. Для этого технологический процесс разбивается на две операции с использованием промежуточной матрицы (см. рис. 6, б). Реализация такого подхода на примере исходной алюминиевой заготовки проиллюстрирована на рис. 6, б, в. Кроме того, для уменьшения сцепления между профилем матрицы и поверхностью заготовки необходимо корректировать форму контактирующей поверхности пластичной среды. Апробированный вариант такого профилирования также показан на рис. 6, б, в.

В ходе исследования была разработана и апробирована физико-математическая модель и методика численного моделирования процесса листовой штамповки пластичным металлом в жесткие матрицы осесимметричных деталей летательных аппаратов в среде ANSYS (модули Transient Structural и Autodyn для нестационарных и динамических задач соответственно). Показано, что для формования деталей с небольшим прогибом (менее 0,2) из разных материалов, включая труднодеформируемые сплавы, скорость пуансона и силы трения скольжения не оказывают существенного влияния на разнотолщинность и конечную форму получаемой детали, что доказывает наличие возможности использовать для этих целей широкую номенклатуру кузнечно-прессового оборудования. Однако для деталей с высоким прогибом (0,2...0,5) более значимым фактором является трение фланца заготовки о поверхность матрицы. Причем с увеличением скорости перемещения пуансона его значимость повышается.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва. В 2 т. Т. 2.* Москва, Физматлит, 2004, 648 с.
- [2] Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., ред. *Физические величины.* Москва, Энергоиздат, 1991, 1232 с.

- [3] Жерноклетов М.В., ред. *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005, 428 с.
- [4] Зенкевич О.К. *Введение в метод конечных элементов*. Москва, Мир, 1981, 304 с.
- [5] Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. *ANSYS в руках инженера. Практическое руководство*. Москва, Едиториал УРСС, 2003, 272 с.
- [6] Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянова И.Е. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч. 1*. Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2010, 271 с.
- [7] Маслов В.Д., Николенко К.А. *Моделирование процессов листовой штамповки в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA*. Самара, Изд-во СГАУ, 2007, 80 с.
- [8] Седов Л.И. *Механика сплошной среды. В 2 томах*. Москва, Наука. Т. 1, 1973, 536 с. Т. 2, 1976, 576 с.
- [9] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов. В 3 томах*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, т. 3, 520 с.

Статья поступила в редакцию 12.05.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бабурин М.А., Колпаков В.И., Вышегородцева А.С., Муляр С.Г. Численное моделирование процесса штамповки осесимметричных деталей из листовых заготовок методом вытяжки пластичным металлом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1696>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Бабурин Михаил Аронович — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: babma@mail.ru

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kolpakov54@mail.ru

Вышегородцева Анастасия Сергеевна — преподаватель факультета «Лингвистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: anastaciarmarchenko@mail.ru

Муляр Сергей Геннадьевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ПАО «РКК «Энергия». e-mail: m_sergey@inbox.ru

Numerical modeling of the process of stamping axisymmetric parts from sheet blanks by extraction with plastic metal

© M.A. Baburin¹, V.I. Kolpakov¹, A.S. Vyshegorodtseva¹,
S.G. Mulyar²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev,
Moscow region, 141070, Russia

The article presents a method of numerical modeling of the process of sheet metal stamping in rigid matrices for aircraft axisymmetric parts. We applied ANSYS environment (modules Transient Structural and Autodyn) for non-stationary and dynamic tasks. The aim of the study is to reduce the time for experimental testing of the technological process. We show the results of mathematical modeling of a workpiece stamping process using a ductile metal considering different values of the strain rates and the coefficient of friction between the matrix and the workpiece. We found out that when forming parts with a small deflection (less than 0.2) from different materials the speed of the punch and the sliding friction force did not have a significant effect on the thickness and final shape of the resulting part. However, as the transfer speed of the punch increases, its significance increases for the parts with a high deflection.

Keywords: numerical modeling, stamping, punch, deformation of the workpiece material, drawing with plastic metal

REFERENCES

- [1] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 648 p.
- [2] Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z., eds. *Fizicheskiye velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Energoizdat Publ., 1991, 1232 p.
- [3] Zhernokletov M.V., ed. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* [Methods for studying the properties of materials under intense dynamic loads]. Sarov, RFNC-VNIIEF, 2005, 428 p.
- [4] Zenkevich O.K. *Vvedeniye v metod konechnykh elementov* [Introduction to the Finite Element Method]. Moscow, Mir Publ., 1981, 304 p.
- [5] Kaplun A.B., Morozov E.M., Olferieva M.A. *ANSYS v rukakh inzhenera. Prakticheskoye rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer. A Practical Guide]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 272 p.
- [6] Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanova I.E. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench. Chast 1* [Engineering analysis in ANSYS Workbench. Part 1]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2010, 271 p.
- [7] Maslov V.D., Nikolenko K.A. *Modelirovaniye protsessov listovoy shtampovki v programnom komplekse ANSYS/LS-DYNA* [Modeling of the processes of sheet punching in the program complex]. Samara, Samara University Publ., 2007, 80 p.
- [8] Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoy sredy. V 2 tomakh* [Continuum mechanics. In 2 volumes]. Moscow, Nauka Publ. Vol. 1, 1973, 536 p. Vol. 2, 1976, 576 p.

- [9] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekeyushchikh protsessov. V 3 tomakh. Tom 3* [Numerical methods in the physics problems of fast processes. In 3 vols. Vol. 3]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p.

Baburin M.A., assistant lecturer of the Department of Technologies for Space-and-Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: babma@mail.ru

Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technologies for Space-and-Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 research papers in the field of mathematical modeling of dynamic processes.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

Vyshegorodtseva A.S., lecturer of the Linguistics Faculty, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: anastaciamarchenko@mail.ru

Mulyar S.G., Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher at S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. e-mail: m_sergey@inbox.ru