Бормотин К.С., Потянихин Д.А., Хлайнг Мин Ко, Синельщиков А.А. Расчет формы инструмента для раздачи средней части трубы по жесткой матрице // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 2. С. 110–117. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.10

Bormotin K.S., Potianikhin D.A., Hlaing Min Ko, Sinelshchikov A.A. Calculation of the tool shape for tube middle part distribution by rigid matrix. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 2, pp. 110-117. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.10

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 2, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.10
УДК 621.735, 517.97, 539.3, 539.52

РАСЧЕТ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБЫ ПО ЖЕСТКОЙ МАТРИЦЕ

К.С. Бормотин, Д.А. Потянихин, Мин Ко Хлайнг, А.А. Синельщиков

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 02 декабря 2022 г.
Одобрена: 20 марта 2023 г.
Принята к публикации:
30 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

обратная задача, итерационный метод, раздача труб, упругость, пластичность, формообразование, метод конечных элементов, двумерная постановка, трехмерная постановка, сходимость.

АННОТАЦИЯ

В современном машиностроении в целом и в авиастроении в частности большое количество деталей получают листовой штамповкой. Для изготовления элементов гидрогазовых систем летательных аппаратов часто применяются формообразующие операции, в которых жидкости и резиноподобные материалы служат рабочей средой, передающей усилие прессования деформируемой заготовке.

В настоящей работе рассматривается процесс раздачи средней части трубчатой заготовки из титанового сплава ОТ4-1. Внутреннее давление на трубчатую заготовку определяется действием рабочего тела при сжатии. Одним из значительных недостатков холодной листовой штамповки является пружинение материала после извлечения из оснастки. Поэтому форма матрицы, используемой для технологического процесса раздачи, должна задавать упреждающую форму трубчатой заготовки, обеспечивающую требуемую остаточную форму после разгрузки. Для определения такой формы матрицы формулируется и решается обратная задача.

Реализация метода решения обратной задачи выполнена в системе MSC.Marc. Для осесимметричной формы детали используется двумерная постановка задачи. В случае тонкостенных конструкций моделирование процесса формообразования выполняется в условиях пластичности с учетом малых деформаций, но больших перемещений и поворотов (общая Лагранжева формулировка). Решение обратной контактной задачи формообразования находится итерационным методом, который построен на основе квазистатического вариационного принципа. Данный алгоритм решения обобщается на трехмерные задачи, когда деталь имеет неосесимметричную форму, в частности эллипсоидальную, тройник и т.д.

В результате решения обратной контактной задачи формообразования трубчатой заготовки итерационным методом была определена требуемая геометрия жесткой матрицы. Сравнение численных результатов с проведенным натурным экспериментом показало удовлетворительное совпадение. Таким образом, представленный метод и его реализация в CAE-системе дает возможность проектировать оснастку на стадии подготовки производства.

© ПНИПУ

© **Бормотин Константин Сергеевич** – д.ф.-м.н., доц., e-mail: cvmi@knastu.ru
Потянихин Дмитрий Андреевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: potyanikhin@mail.ru
Мин Ко Хлайнг – асп., e-mail: minkohlaing53@gmail.com
Синельщиков Александр Андреевич – асп., e-mail: aa.sinelshchikov@mail.ru

Konstantin S. Bormotin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: cvmi@knastu.ru
Dmitrii A. Potianikhin – CSc of Physical and Mathematical Sciencesы, Associate Professor, e-mail: potyanikhin@mail.ru
Hlaing Min Ko – PhD Student, e-mail: minkohlaing53@gmail.com
Aleksandr A. Sinelshchikov – PhD Student, e-mail: aa.sinelshchikov@mail.ru

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

CALCULATION OF THE TOOL SHAPE FOR TUBE MIDDLE PART DISTRIBUTION BY RIGID MATRIX

K.S. Bormotin, D.A. Potianikhin, Min Ko Hlaing, A.A. Sinelshchikov

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amure, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 December 2022
Approved: 20 March 2023
Accepted for publication:
30 April 2023

Keywords:

inverse problem, iterative method, pipe expansion, elasticity, plasticity, shaping, finite element method, two-dimensional formulation, three-dimensional formulation, convergence.

ABSTRACT

In modern mechanical engineering in general, and in the aircraft industry in particular, a large number of parts are obtained by sheet stamping. For the manufacture of elements of hydrogas systems of aircraft, shaping operations are often used, in which liquids and rubber-like materials serve as a working medium that transfers the pressing force to a deformable workpiece.

In this paper, we consider the process of expanding the middle part of a tubular billet made of titanium alloy OT4-1. The internal pressure on the tubular billet is determined by the action of the working fluid during compression. One of the significant disadvantages of cold sheet forming is the springback of the material after being removed from the tooling. Therefore, the shape of the die used for the technological process of expansion must set the proactive shape of the tubular billet, providing the desired residual shape after unloading. To determine such a matrix form, an inverse problem is formulated and solved.

The implementation of the method for solving the inverse problem is carried out in the MSC.Marc system. For the axisymmetric shape of the part, a two-dimensional statement of the problem is used. In the case of thin-walled structures, the modeling of the shaping process is carried out under plasticity conditions, taking into account small deformations, but large displacements and rotations (general Lagrangian formulation). The solution of the inverse contact problem of shaping is found by the iterative method, which is based on the quasi-static variational principle. This solution algorithm is generalized to three-dimensional problems, when the part has a non-axisymmetric shape, in particular, ellipsoidal, tee, etc.

As a result of solving the inverse contact problem of shaping a tubular workpiece by the iterative method, the required geometry of the rigid matrix was determined. Comparison of the numerical results with the conducted full-scale experiment showed a satisfactory agreement. Thus, the presented method and its implementation in the CAE system makes it possible to design tooling at the pre-production stage.

© PNRPU

Введение

Разработка и внедрение новых прогрессивных методов заготовительно-штамповочного производства, которые приводят к повышению размерно-геометрической точности изделий, являются актуальными задачами. Необходимо внедрять новые теоретические методы исследования процессов штамповки с целью сокращения сроков технологической подготовки производства при внедрении новых деталей на промышленных предприятиях.

Теоретическим и практическим вопросам формообразования деталей из тонкостенных трубчатых заготовок посвящено большое количество работ [1–27]. В настоящей работе представлен способ расчета формы инструмента для раздачи средней части трубы по жесткой матрице, который основан на методе решения обратных задач упругопластичности по расчёту формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала заготовки.

1. Технология раздачи средней части трубы по жесткой матрице

Согласно технологии раздачи, воздействие на деформируемую деталь передаётся через рабочее тело посредством давления на него пуансоном [28–33] (рис. 1). На чертеже приведено осевое сечение. Левая часть соответствует расположению заготовки и оснастки до деформирования, правая часть соответствует максимальному перемещению пуансона пресса. На основание *1* устанавливается разборная матрица, состоящая из нижней части *2* и верхней части *3*. Внутри матрицы помещается трубчатая заготовка *4* и эластичное рабочее тело *5*. Пуансон *6*, перемещаясь вследствие усилия пресса *P*, создает давление через рабочее тело на внутренней стенке трубчатой заготовки. В результате происходит раздача ее средней части. После этого пуансон поднимают вверх, разбирают матрицу и вынимают готовую деталь с рабочим телом. Таким образом, необходимая остаточная форма трубчатой заготовки после освобождения из матрицы и разгрузки задаётся формой жёсткой матрицы. Для обеспечения высокой точности, качества деталей и сокращения времени постановки производства необходима формулировка и решение обратной задачи по определению формы матрицы.

Размеры заготовки: длина трубы 65,5 мм, толщина 1 мм. Титановая заготовка имеет следующие характеристики материала: модуль Юнга E = 110 ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}33$, предел текучести σ_T = 583 МПа, модуль линейного упрочнения E_T = 1076 МПа.

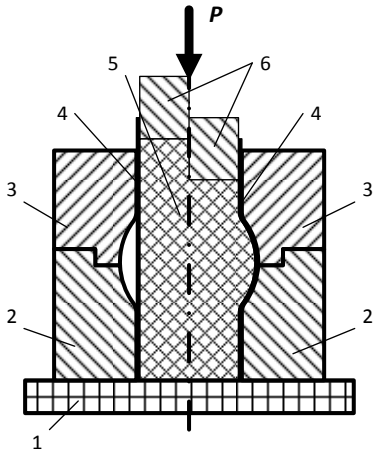


Рис. 1. Схема раздачи трубчатой заготовки с использованием внутреннего наполнителя

Fig.1. Scheme of a tubular billet distribution with inner filler

2. Метод решения обратной задачи раздачи трубчатой заготовки

Для определения формы матрицы формулируется обратная задача: необходимо определить перемещения поверхности матрицы, которые обеспечивают заданную остаточную форму детали после раздачи рабочим телом средней части трубчатой заготовки и разгрузки (извлечения детали из матрицы).

Пусть $V \subset R^3$ – ограниченная область трубчатой заготовки с достаточно регулярной границей S. Контактная поверхность (контур) жёсткого тела (матрицы) с деформируемым обозначается через S_c ($S_c \subset S$). Обозначим через $u=(u_1,u_2,u_3)$, $\tilde{u}=(\tilde{u}_1,\tilde{u}_2,\tilde{u}_3)$, $\bar{u}=(\bar{u}_1,\bar{u}_2,\bar{u}_3)$ векторы текущих, остаточных перемещений деформируемого тела и вектор перемещений контактного тела (матрицы). Точкой сверху обозначаются скорости текущих и остаточных перемещений $\dot{u}_i$, $\dot{\tilde{u}}_i$, $\dot{\bar{u}}_i$. Скалярное произведение имеет вид $(\cdot,\cdot)_S$: $(u,v)_S=\int\limits_S \sum\limits_{i=1}^{3} u_i v_i dS$. Соответствующая этому скалярному произведению норма имеет вид

$$\|u\|_S=\sqrt{(u,u)_S}=\left(\int\limits_S \sum_{i=1}^{3} u_i^2 dS\right)^{1/2}.$$

В случае тонкостенных конструкций задача формообразования рассматривается в условиях пластичности с учётом малых деформаций, но больших перемещений и поворотов (общая Лагранжева формулировка). Для построения метода решения обратной задачи формообразования с контактной жёсткой матрицей рассматривается квазистатический вариационный принцип с функционалом [34; 35]

$$J(\dot{\bar{u}},\dot{u},\dot{\tilde{u}})=\frac{1}{2\varepsilon_1}\|\dot{\bar{u}}-\dot{\bar{u}}^*\|_{S_c}^2+W_c+a(\dot{u},\dot{u})+(\dot{p},\dot{u})_{S_p}+$$
$$+a(\dot{\tilde{u}},\dot{\tilde{u}})+\frac{1}{2\varepsilon_2}\|\dot{\tilde{u}}-\dot{\tilde{u}}^*\|_S^2, \quad (1)$$
$$\varepsilon_1>0,\ \varepsilon_1\to 0,\ \varepsilon_2>0,\ \varepsilon_2\to 0,$$

где W_c – контактный потенциал, полученный наложением контактных условий на формулировку уравнений движения тел методом штрафных функций [36–38] и дифференцированием по t:

$$W_c=\int\limits_{S_c}\frac{1}{\varepsilon_n}g_n\dot{g}_n+\frac{1}{\varepsilon_t}g_t\,\dot{g}_t\,dS,$$
$$\varepsilon_n>0,\ \varepsilon_n\to 0,\ \varepsilon_t>0,\ \varepsilon_t\to 0.$$

Здесь $g_n=n(\bar{u}-u)$, $\dot{g}_n=n(\dot{\bar{u}}-\dot{u})$ – нормальный перехлест (взаимное проникновение по нормали к границе S_c) контактирующих частиц и его скорость, $g_t=\tau(\bar{u}-u)$, $\dot{g}_t=\tau(\dot{\bar{u}}-\dot{u})$ – касательный перехлест и его скорость, n – единичный вектор нормали к контактной поверхности, τ – единичный касательный вектор к контактной поверхности; $t\in[0,T]$ – параметр деформирования тела; p – давление с внутренней стороны заготовки S_p; $\dot{\tilde{u}}^*$, $\dot{\bar{u}}^*$ – заданные остаточные скорости перемещений тела и текущие скорости перемещений контактного тела; потенциальные формы определяются в виде [36]:

$$a(\dot{u},\dot{v})=\int\limits_V[\partial E(\dot{u}_{i,j})/\partial\dot{u}_{i,j}]\dot{v}_{i,j}dV,$$
$$a(\dot{\tilde{u}},\dot{\tilde{v}})=\int\limits_V[\partial\tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j})/\partial\dot{\tilde{u}}_{i,j}]\dot{\tilde{v}}_{i,j}dV,$$
$$E(\dot{u}_{i,j})=(1/2)c_{ijpl}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{pl}-c_{ijpl}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}^p_{pl}+(1/2)\sigma_{ij}\dot{u}_{p,i}\dot{u}_{p,j},$$
$$\tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j})=(1/2)c_{ijpl}\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij}\dot{\tilde{\varepsilon}}_{pl}-c_{ijpl}\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij}\dot{\varepsilon}^p_{pl}+(1/2)\rho_{ij}\dot{\tilde{u}}_{p,i}\dot{\tilde{u}}_{p,j},$$

где c_{ijkl} – компоненты тензора упругих констант, $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij}$ – компоненты скоростей текущих и остаточных деформаций, $\dot{\varepsilon}^p_{ij}=\lambda\cdot\partial f/\partial\sigma_{ij}$ – компоненты скоростей пластических деформаций, $\lambda>0$, $\partial f/\partial\sigma_{ij}=s_{ij}$ – вектор в пространстве компонент девиатора тензора напряжений, направленный по нормали к поверхности текучести, уравнение $f=0$ определяет поверхность в пространстве компонент девиатора тензора напряжений [36]; для компонент скоростей деформаций выполняются соотношения

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=(1/2)(\dot{u}_{i,j}+\dot{u}_{j,i}+\dot{u}_{p,i}u_{p,j}+u_{p,i}\dot{u}_{p,j}),$$
$$\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ij}=(1/2)(\dot{\tilde{u}}_{i,j}+\dot{\tilde{u}}_{j,i}+\dot{\tilde{u}}_{p,i}\tilde{u}_{p,j}+\tilde{u}_{p,i}\dot{\tilde{u}}_{p,j}),$$
$$u_{i,j}=\frac{\partial u_i}{\partial x_j},\ i,j,p,l=1,2,3.$$

Условие стационарности функционала приводит к уравнениям равновесия для скоростей текущих и остаточных напряжений в V и граничным условиям на поверхности S.

Аналогично построению метода решения в [34; 35] на основе вариационного неравенства для функционала (1) находится итерационный метод решения обратных задач формообразования:

$$\overline{u}_i^{k+1} = \overline{u}_i^k + \alpha^k (\tilde{u}_i^* - \tilde{u}_i^k), \qquad (2)$$

где $0 < \alpha^k < 2$, $k = 0, 1, 2, \ldots$.

3. Численные результаты решения обратной задачи

С учётом дискретизации вариационных уравнений механики образуются стандартные конечно-элементные уравнения для решения контактной задачи деформирования [36–39]:

$$\mathbf{K}\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{R}}, \ \tilde{\mathbf{K}}\hat{\dot{\mathbf{U}}} = \hat{\dot{\mathbf{R}}}(\dot{\mathbf{U}}),$$

где $\mathbf{K}$, $\tilde{\mathbf{K}}$ – симметричные матрицы касательной жёсткости, определённые в момент t; $\dot{\mathbf{R}}$ – вектор скорости внутренних и внешних сил; $\hat{\dot{\mathbf{R}}}$ – вектор скорости сил, обусловленных начальными деформациями и начальными напряжениями. В результате решения первой задачи находится деформированная модель с распределением напряжений и деформаций. Решение второй задачи на основе данных о начальных напряжениях и деформациях определяет перемещения разгрузки. Остаточные узловые перемещения вычисляются по формуле $\tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{U} + \hat{\mathbf{U}}$. Решение обратной задачи реализуется в системе MSC.Marc, используя возможности по созданию пользовательских подпрограмм по управлению граничными условиями и выводу необходимых результатов. Для сокращения времени расчета контактных задач в модели раздачи трубы действие на заготовку рабочего тела при сжатии заменяется внутренним давлением. Решение обратной задачи в случае воздействия на деформируемую деталь через рабочее тело представлено в статье [30].

Так как задача осесимметричная, то можно использовать двумерную постановку. В этом случае моделирование деформирования заготовки выполнено плоскими четырехузловыми элементами для осесимметричных задач. Для расчета необходимой формы оснастки в задаче раздачи трубы методом (2) будут рассматриваться только радиальные перемещения по оси x_2 (рис. 2). Заданные остаточные отклонения задаются перемещениями $\tilde{u}_2^*$, максимальное значение которых равно 4,9 мм. В исходной модели внутренняя поверхность матрицы перемещена на заданные перемещения заготовки, т.е. $\overline{u}_2^0 = \tilde{u}_2^*$.

В случае, если деталь имеет не осесимметричную форму (в частности, эллипсоидальную, тройник и т.д.), то необходимо рассматривать трехмерную постановку задачи. Для анализа решения обратных задач в качестве примера рассматривается четверть осесимметричной детали в трехмерной постановке. В этом случае моделирование деформирования заготовки выполнено восьмиузловыми изопараметрическими элементами.

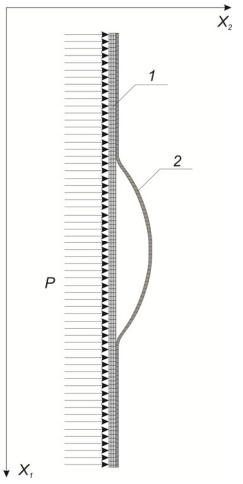


Рис. 2. Исходная 2D-конечно-элементная модель заготовки трубы и матрицы: *1* – заготовка; *2* – матрица

Fig.2. Initial 2D finite element model of the tube billet and die: *1* – billet; *2* – die

Конечно-элементная модель представлена на рис. 3 (*1* – заготовка, *2* – матрица). При расчёте необходимой формы оснастки в задаче раздачи трубы методом (2) для трехмерной постановки будут рассматриваться перемещения по осям x_2, x_3 (см. рис. 3). Заданные остаточные отклонения задаются перемещениями $\tilde{u}_2^*$, $\tilde{u}_3^*$, максимальное значение которых в соответствующих координатных плоскостях равно 4,9 мм. В исходной модели внутренняя поверхность матрицы перемещена на заданные перемещения заготовки, т.е. $\overline{u}_2^0 = \tilde{u}_2^*$, $\overline{u}_3^0 = \tilde{u}_3^*$ (в конечно-элементной модели данные соотношения определяются для ближайших крайних узлов матрицы и заготовки).

Для улучшения условий сходимости решения задач методом конечных элементов контактная задача деформирования разбивается на две подзадачи, включающие перемещение модели матрицы к заготовке (исходные модели заготовки и матрицы находятся на незначительном расстоянии) и прижатие трубчатой заготовки к поверхности матрицы под действием давления.

Таким образом, перемещения, входящие в метод (2), определяются на основе решения следующих задач:

1. Изменение геометрии поверхности матрицы и установка матрицы вблизи заготовки (рис. 4).

2. Задача деформирования трубчатой заготовки под действием давления. В результате заготовка должна быть прижата к элементам матрицы (рис. 5).

3. Упругая разгрузка заготовки. В результате полученных остаточных перемещений заготовки по методу (2) определяются перемещения узлов матрицы, по которым изменяется форма матрицы.

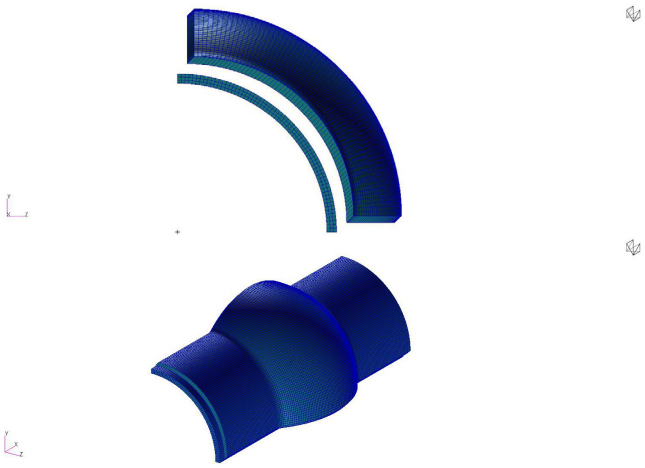


Рис. 3. Исходная 3D-конечно-элементная модель заготовки трубы и матрицы

Fig. 3. Initial 3D finite element model of the pipe blank and die

Решение данных задач повторяется на каждой итерации до достижения заданной точности. Сходимость итерационного метода оценивается по среднеквадратичной норме $e^k = \xi^k / \xi^1$:

для двумерной задачи

$$\xi^k = \left(\sum\nolimits_S \left(\tilde{u}_2^k - \tilde{u}_2^{\,*} \right)^2 \right)^{1/2},$$

для трехмерной задачи

$$\xi^k = \left(\sum\nolimits_S \left[\left(\tilde{u}_2^k - \tilde{u}_2^{\,*} \right)^2 + \left(\tilde{u}_3^k - \tilde{u}_3^{\,*} \right)^2 \right] \right)^{1/2}, \qquad (3)$$

где S – область крайних внешних узлов заготовки, k – номер итерации.

Граничные условия для рассматриваемых задач указываются следующие. В задаче деформирования матрицы заготовка зафиксирована, а к узлам контактной поверхности матрицы заданы перемещения, обеспечивающие изменение геометрии поверхности и прижатие к заготовке. В задаче деформирования трубчатой заготовки заданы условия симметрии, а в узлах посередине заготовки исключены перемещения по оси. На внутренней поверхности заготовки задано давление, обеспечивающее прижатие ее к жесткой матрице. На поверхности контакта заготовки и матрицы задано трение с коэффициентом 0,1. В задаче разгрузки трубчатой заготовки под действием начальных напряжений, в отличие от задачи деформирования, исключаются контактные условия и давление.

В результате решения обратной задачи раздачи трубчатой заготовки итерационным методом (2) найдены перемещения узлов матрицы до необходимой геометрии поверхности, обеспечивающей заданные остаточные перемещения заготовки. В случае двумерной постановки максимальные отклонения вычисленной поверхности матрицы от заготовки будут $\max u_2 = 5$ мм. На рис. 6 дан график сходимости итерационного метода (2) в зависимости от значения α^k.



Рис. 4. Конфигурация моделей после изменения геометрии поверхности матрицы и установке его вблизи заготовки

Fig. 4. Configuration of models after changing the geometry of the matrix surface and installing it near the workpiece

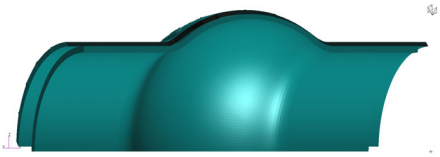


Рис. 5. Конфигурация моделей после прижатия заготовки к пуансону под давлением

Fig. 5. Configuration of models after pressing the workpiece to the punch under pressure

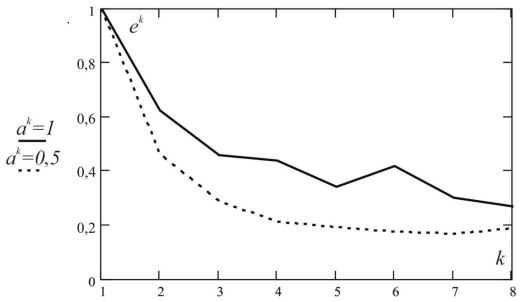


Рис. 6. График сходимости метода при решении двумерной обратной задачи

Fig. 6. Convergence graph of the method for solving a two-dimensional inverse problem

В таблице представлены для каждой итерации перемещения узла в средней части трубчатой заготовки в упреждающей и разгруженной конфигурации в случае трехмерной постановки. На рис. 7 дан график сходимости итерационного метода (2) при $\alpha^k = 1$.

Перемещения узла на внешней поверхности заготовки

Node displacements on the outer surface of the workpiece

Итерация (Iteration)	Перемещения до разгрузки, мм (Displacements before unloading, mm)	Перемещения после разгрузки, мм (Displacements after unloading, mm)
1	4,88	4,75
2	5,01	4,89
3	5,02	4,90

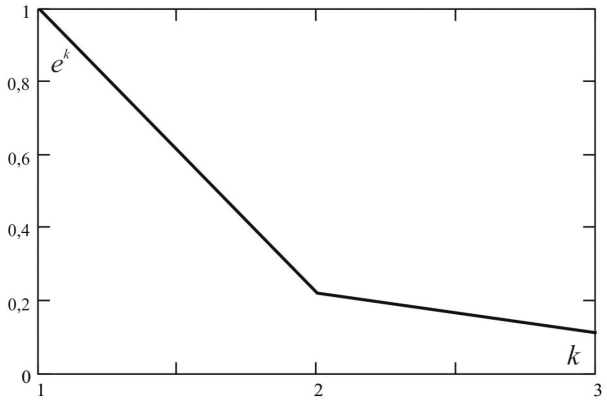


Рис. 7. График сходимости метода при решении трехмерной обратной задачи

Fig. 7. Convergence graph of the method for solving a three-dimensional inverse problem

Заключение

Результаты расчетов для двумерных постановок задач с действием рабочего тела [30] и давления на заготовку демонстрируют сходимость итерационного метода и совпадение с экспериментальными данными. Для трехмерных моделей для сокращения времени расчета рассматривается нагружение заготовки давлением. Различные постановки обратных задач раздачи трубчатых заготовок дают одинаковые результаты решения методом (2) для осесимметричной детали.

Таким образом, предлагаемый метод может быть использован для определения геометрии матрицы при раздаче неосесимметричной конечной формы трубчатой заготовки. Реализация его в CAE-системе позволяет спроектировать оснастку на этапе подготовки производства.

Библиографический список

1. Афанасьев А.Е., Каргин В.Р., Каргин Б.В. Компьютерный анализ процесса раздачи труб прессованием // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 2(33). – С. 97.

2. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, В.П. Самохвалов, Ю.В. Федотов. – М.: Наука и технологии, 2002. – 393 с.

3. Веселов А.А. Определение размеров концов труб после раздачи методом пластического деформирования // Морской вестник. – 2012. – № 1(41). – С. 15–16.

4. Громова Е.Г., Еськина Е.В., Шаров А.А. Исследование процесса стесненного изгиба листовых деталей с использованием полиуретана методом конечно-элементного моделирования // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – № 3. – С. 86–90.

5. Каргин В.Р., Афанасьев А.Е., Каргин Б.В. Влияние противодавления при прямом прессовании труб с раздачей // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8. – № 6(37). – С. 9.

6. Кондратенко Л.А., Миронова Л.И. Образование остаточных напряжений при раздаче стальных труб // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 58–63.

7. Кузнецов С.В. Влияние поперечных сил на качество деталей, получаемых методами листовой штамповки // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5(107). – С. 438–442.

8. Стесненный изгиб в холодной листовой штамповке эластомером / В.Г. Кулаков, В.К. Моисеев, А.А. Шаров, О.В. Ломовский, А.Н. Плотников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6-4. – С. 855–860.

9. Марьин С.Б. Изготовление деталей из труб давлением эластичных и сыпучих сред для гидрогазовых систем летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4-2. – С. 416–419.

10. Непершин Р.И. Раздача тонкостенной трубы пуансоном с криволинейным профилем // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 1. – С. 80–88.

11. Орлов Г.А., Котов В.В., Орлов А.Г. Компьютерное моделирование поведения разностенных труб под внутренним давлением // Металлург. – 2017. – № 2. – С. 18–21.

12. Моделирование операции раздачи трубных заготовок / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Д.В. Хачатрян, И.Е. Смолович, В.Ю. Киндеров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 618–631.

13. Феоктистов С.И., Чжо З.С. Определение предельного коэффициента раздачи по FLD-диаграммам // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 9. – С. 3–7.

14. Феоктистов С.И., Чжо З.С. Определение технологических возможностей титановых и алюминиевых сплавов при раздаче // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – Т. 1, № 1(37). – С. 4–9.

15. Ahmad Omar, Asim Tewari, Narasimhan K. Effect of bulge ratio on the deformation behavior and fracture location during welded steel tube hydroforming process // Results in Materials. – 2020. – Vol. 6. – 100096.

16. Tube hydroforming: current research, applications and need for training / M. Ahmetoglu, K. Sutter, X.J. Li, T. Altan // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – Vol. 98. – P. 224–231.

17. Expansion and reduction of thin-walled tubes using a die: Experimental and theoretical investigation / B.P.P. Almeida, M.L. Alves, P.A.R. Rosa, A.G. Brito, P.A.F. Martins // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46, iss. 12–13. – P. 1643–1652.

18. Alves L.M., Martins P.A.F. Cold expansion and reduction of thin-walled PVC tubes using a die // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209. – P. 4229–4236.

19. Alves L.M., Leitao P.M.F., Martins P.A.F. Elastomer-assisted compression beading of tubes // Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture. – 2014. – Vol. 228(7). – P. 744–756.

20. Anisotropic effects in the compression beading of aluminum thin-walled tubes with rubber / L. Belhassen, S. Koubaa, M. Wali, F. Dammak // Thin-Walled Structures. – 2017. – Vol. 119. – P. 902–910.

21. Bulge hydroforming of tube by rubber mandrel without axial feed: experiment and numerical simulation / Faisal Qayyum, Masood Shah, Saad Ali, Umar Ali // Proceedings of the First International Symposium on Automotive and Manufacturing Engineering. – 2015. – Vol. 1. – P. 19–26.

22. Nosrati G.H., Gerdooei M., Naghibi F.M. Experimental and numerical study on formability in tube bulging: A comparison between hydroforming and rubber pad forming // Materials and Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 32, iss. 12. – P. 1353–1359.

23. Girard A.C., Grenier Y.J., Mac Donald B.J. Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 172. – P. 346–355.

24. Pipan J., Kosel F. Numerical simulation of rotational symmetric tube bulging with inside pressure and axial compression // Int. J. of Mechanical Sciences. – 2002. – Vol. 44, iss. 3. – P. 645–664.

25. Kim S., Kim Y. Analytical study of tube hydroforming // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 128, iss. 1–3. – P. 232–239.

26. The forming of axisymmetric and asymmetric components from tube / M.E. Limb, J. Chakrabarty, S. Garber, P.B. Mellor // Proceedings of the Fourteenth International MTDR Conference. – 1974. – P. 799–805.

27. Thiruvarudchelvan S., Travis F.W. Tube Bulging with a urethane rod // Journal of Materials Processing Technology. – 1990. – Vol. 23. – P. 195–209.

28. Потянихин Д.А., Синельщиков А.А., Мин Ко Хлайнг. Моделирование напряжённо-деформированного состояния трубчатой заготовки при раздаче средней части по жёсткой матрице // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 105–110.

29. Maryin S.B., Aung P.W. Working body for deformation of thin-walled pipe billets // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 628–633.

30. Метод решения обратной задачи раздачи средней части трубы для расчёта формы штампа / К.С. Бормотин, Д.А. Потянихин, А.А. Синельщиков, Мин Ко Хлайнг, И.Н. Журбина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2022. – № 5(61). – С. 40–45.

31. Исследование процесса раздачи средней части трубной заготовки с подпором / С.Б. Марьин, Г.А. Щербатюк, В.Д. Кириллин, М.И. Пак // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № 7 (55). – С. 73–78.

32. Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Лин Х. Моделирование напряжённо-деформированного состояния толстостенных цилиндрических оболочек с учётом физической нелинейности материала // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № 3 (59). – С. 12–20.

33. Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Лин Х. Определение напряжённо-деформированного состояния при формоизменении цилиндрических труб с использованием конической оснастки // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № 3 (59). – С. 4–11.

34. Бормотин К.С., Вин Аунг. Метод решения обратной задачи в процессе обтяжки панели // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2018. – № 3 (37). – С. 47–57.

35. Бормотин К.С. Метод решения обратных задач неупругого деформирования тонкостенных панелей // Вычислительные методы и программирование. – 2017. – Т. 18. – С. 359–370.

36. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твёрдых тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 262 с.

37. Wriggers P. Computational contact mechanics. – Heidelberg: Springer, 2006.

38. Бормотин К.С., Белых С.В., Вин А. Математическое моделирование обратных задач многоточечного формообразования в режиме ползучести с помощью реконфигурируемого устройства // Вычислительные методы и программирование. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 258–267.

39. Marc 2021, Vol A: Theory and User Information, MSC.Software Corporation [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mscsoftware.com/product/marc (дата обращения: 10.03.2023).

References

1. Afanasyev A.E., Kargin V.R., Kargin B.V. Kompjuternyy analiz protsessa razdachi trub pressovaniyem [Computer analysis of distribution tubes pressing]. *Internet-zhurnal Naukovedeniye*, 2016, Vol. 8, No. 2(33), p. 97.

2. Barvinok V.A., Kirilin A.N., Komarov A.D., Moiseyev V.K., Samokhvalov V.P., Fedotov Yu.V. Vysokoeffektivnyye tekhnologicheskiye protsessy izgotovleniya elementov truboprovodnykh i toplivnykh sistem letatel'nykh apparatov [Highly efficient technological processes for the manufacture of elements of pipeline and fuel systems of aircraft]. Moscow, Nauka i tekhnologii, 2002, 393 p.

3. Veselov A.A. Opredeleniye razmerov kontsov trub posle razdachi metodom plasticheskogo deformirovaniya [Determination of the dimensions of the ends of pipes after expansion by the method of plastic deformation]. *Morskoy vestnik*, 2012, No. 1(41), pp. 15-16.

4. Gromova E.G., Es'kina E.V., Sharov A.A. Issledovaniye protsessa stesnennogo izgiba listovykh detaley s ispol'zovaniyem poliuretana metodom konechno-elementnogo modelirovaniya [Research of process of the constrained bend of sheet details with use of a poly-urethane by a method of certainly-element modeling]. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2011, No. 3, pp. 86-90.

5. Kargin V.R., Afanasyev A.E., Kargin B.V. Vliyaniye protivodavleniya pri pryamom pressovanii trub s razdachey [Influence of counter-pressure at direct pressing of pipes with distribution] // *Internet-zhurnal Naukovedeniye*, 2016, Vol. 8, No. 6(37), p. 9.

6. Kondratenko L.A., Mironova L.I. Obrazovaniye ostatochnykh napryazheniy pri razdache stal'nykh trub [Formation of residual stresses during radial deformation of steel pipes]. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, No. 1, p. 58-63.

7. Kuznetsov S.V. Vliyaniye poperechnykh sil na kachestvo detaley, poluchayemykh metodami listovoy shtampovki [Influence of cross-section forces on quality of the details received by methods of a sheet-metal forming]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*, 2014, No. 5(107), pp. 438-442.

8. Kulakov V.G., Moiseyev V.K., Sharov A.A., Lomovskiy O.V., Plotnikov A.N. Stesnennyy izgib v kholodnoy listovoy shtampovke elastomerom [Constrained bending in cold sheet stamping elastomer]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, Vol. 15, No. 6-4, pp. 855-860.

9. Maryin S.B. Izgotovleniye detaley iz trub davleniyem elastichnykh i sypuchikh sred dlya gidrogazovykh sistem letatel'nykh apparatov [Manufacturing of details from pipes by pressure of elastic and friable environments for the hydrogas systems of aircrafts]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011. – Vol. 13, No. 4-2, pp. 416-419.

10. Nepershin R. I. Thin-walled pipe expansion by a punch with a curvilinear profile // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010, Vol. 39, No. 1. pp. 66-72.

11. Orlov G. A., Kotov V. V., Orlov A. G. Simulation of the behavior of pipes with variable wall thickness under internal pressure, *Metallurgist*, 2017, Vol. 61, No. 1-2, pp. 106-110.

12. Sosenushkin E.N., Yanovskaya E.A., Khachatryan D.V., Smolovich I.E., Kinderov V.Yu. Modelirovaniye operatsii razdachi trubnykh zagotovok [Modelling of operation of distribution of pipe preparations]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2013, No. 3, pp. 618-631.

13. Feoktistov S.I., Zho Zayar So. Opredeleniye predel'nogo koeffitsiyenta razdachi po FLD-diagrammam [Determination of the limiting expanding ratio by FLD-diagrams]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2019, No. 9, pp. 3-7.

14. Feoktistov S.I., Zho Zayar So. Opredeleniye tekhnologicheskikh vozmozhnostey titanovykh i alyuminiyevykh splavov pri razdache [Determination of technological possibilities of titanium and aluminum alloys at distribution]. *Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019. Vol. 1, No 1(37), pp. 4-9.

15. Ahmad Omar, Asim Tewari, Narasimhan K. Effect of bulge ratio on the deformation behavior and fracture location during welded steel tube hydroforming process // Results in Materials. – 2020. – Vol. 6. – 100096.

16. Ahmetoglu M., Sutter K., Li X. J., Altan T. Tube hydroforming: current research, applications and need for training // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – Vol. 98. – P. 224-231.

17. Almeida B. P. P., Alves M. L., Rosa P. A. R., Brito A.G., Martins P. A. F. Expansion and reduction of thin-walled tubes using a die: Experimental and theoretical investigation // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46. – Issue 12-13. – P. 1643-1652.

18. Alves, L. M. Cold expansion and reduction of thin-walled PVC tubes using a die / L. M. Alves, P. A. F. Martins // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol.209. – P. 4229-4236.

19. Alves L. M., Leitao P. M. F., Martins P. A. F. Elastomer-assisted compression beading of tubes // Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture. – 2014. – Vol. 228(7). – P. 744-756.

20. Belhassen L., Koubaa S., Wali M., Dammak F. Anisotropic effects in the compression beading of aluminum thin-walled tubes with rubber // Thin-Walled Structures. – 2017. – Vol. 119. – P. 902-910.

21. Faisal Qayyum, Masood Shah, Saad Ali, Umar Ali. Bulge hydroforming of tube by rubber mandrel without axial feed: experiment and numerical simulation // Proceedings of the First International Symposium on Automotive and Manufacturing Engineering. – 2015. – Vol. 1. – P. 19-26.

22. Nosrati G. H., Gerdooei M., Naghibi F. M. Experimental and numerical study on formability in tube bulging: A comparison between hydroforming and rubber pad forming // Materials and Manufacturing Processes. – 2017. –Vol. 32. – Issue 12. – 1353–1359.

23. Girard, A. C. Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod / A. C. Girard, Y. J. Grenier, B.J. Mac Donald // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 172. – P. 346-355.

24. Pipan J., Kosel F. Numerical simulation of rotational symmetric tube bulging with inside pressure and axial compression // Int. J. of Mechanical Sciences. – 2002. – Vol. 44. – Issue 3. – P. 645–664.

25. Kim S., Kim Y. Analytical study of tube hydroforming // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 128. – Issue 1–3. – P. 232-239.

26. Limb M. E., Chakrabarty J., Garber S., Mellor P. B. The forming of axisymmetric and asymmetric components from tube // Proceedings of the Fourteenth International MTDR Conference. – 1974. – P. 799-805.

27. Thiruvarudchelvan S., Travis F. W. Tube Bulging with a urethane rod // Journal of Materials Processing Technology. – 1990. – Vol. 23. – P. 195-209.

28. Potianikhin D.A., Sinelshchikov A.A., Min Ko Hlaing. Modelirovaniye napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya trubchatoy zagotovki pri razdache sredney chasti po zhostkoy matritse [Simulation of the stress-strain state of a tubular billet during the expansion of its middle part using rigid die]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*, 2021, No. 2-2 (52), pp. 105-110.

29. Maryin S.B., Aung P.W. Working body for deformation of thin-walled pipe billets // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 628-633.

30. Bormotin K.S., Potianikhin D.A., Sinelshchikov A.A., Min Ko Hlaing, Zhurbina I.N. Metod resheniya obratnoy zadachi razdachi sredney chasti truby dlya raschota formy shtampa [Method for solving the inverse problem of the distribution of the middle part of the tube to calculate the die shape]. *Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, No. 5(61), pp. 40-45.

31. Maryin S.B., Shcherbatyuk G.A., Kirillin V.D., Pak M.I. Issledovaniye protsessa razdachi sredney chasti trubnoy zagotovki s podporom [Investigation of distribution process of the middle part of the pipe billet with backup]. Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2021, No. 7 (55), pp. 73-78.

32. Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Lin H. Modelirovaniye napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya tolstostennykh tsilindricheskikh obolochek s uchotom fizicheskoy nelineynosti materiala [Modeling of the stress-strain state of thick-walled cylindrical shells taking into account physical nonlinearity of the material]. Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2022, No. 3 (59), pp. 12-20.

33. Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Lin H. Opredeleniye napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya pri formoizmenenii tsilindricheskikh trub s ispol'zovaniyem konicheskoy osnastki [Determination of the stress-strain state when forming cylindrical pipes using conical tooling]. Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2022, No. 3 (59), pp. 4-11.

34. Bormotin K.S., Vin Aung. Metod resheniya obratnoy zadachi v protsesse obtyazhki paneli [Method of solving the inverse problem in the process of panel stretch-forming]. Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya, 2018, No. 3(37), pp. 47-57.

35. Bormotin K.S. Metod resheniya obratnykh zadach neuprugogo deformirovaniya tonkostennykh paneley [A method for solving inverse problems of inelastic deformation of thin-walled panels]. Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye, 2017, Vol. 18, pp. 359-370.

36. Korobeynikov S.N. Nelineynoye deformirovaniye tvordykh tel [Nonlinear deformation of solid bodies]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2000, 262 p.

37. Wriggers P. Computational contact mechanics. – Heidelberg: Springer, 2006.

38. Bormotin K.S., Belykh S.V., Win A. Matematicheskoye modelirovaniye obratnykh zadach mnogotochechnogo formoobrazovaniya v rezhime polzuchesti s pomoshch'yu rekonfiguriruyemogo ustroystva [Mathematical modeling of inverse multipoint forming problems in the creep mode using a reconfigurable tool] // Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye, 2016, Vol. 17, pp. 258-267.

39. Marc 2021, Vol A: Theory and User Information, MSC.Software Corporation http://www.mscsoftware.com/product/marc.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-11-00165).
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 21-11-00165).
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.