

Научная статья

УДК 539.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176840>

## **ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАЗДАЧЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК В КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МАТРИЦЕ**

**Сергей Иванович Феокистов<sup>1</sup>, Иван Константинович Андрианов<sup>2</sup>✉, Сергей Борисович Марьин<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Комсомольск-на-Амуре, Россия

<sup>1</sup>[serg\\_feo@mail.ru](mailto:serg_feo@mail.ru)

<sup>2</sup>[ivan\\_andrianov\\_90@mail.ru](mailto:ivan_andrianov_90@mail.ru)✉

<sup>3</sup>[maryinsb@mail.ru](mailto:maryinsb@mail.ru)

**Аннотация.** В исследовании рассматривается численно-аналитическое моделирование напряжённно-деформированного состояния и силовых характеристик при раздаче тонкостенных трубных заготовок в криволинейной осесимметричной матрице. При разработке модели используются уравнения равновесия безмоментной теории тонких осесимметричных оболочек с учетом нелинейной пластичности, изменения толщины стенки и контактного трения. В основе расчётов лежит численный метод переменных параметров упругости, что позволяет определить напряжения и деформации, распределение толщины в меридиональном сечении, величину контактного давления, а также построить

график изменения усилия раздачи в зависимости от перемещения точки приложения усилия относительно матрицы. Математическая модель для оценки напряженно-деформированного состояния трубных заготовок при раздаче построена для матрицы, профиль которой описывается произвольной функцией. Численная методика расчета напряженно-деформированного состояния построена на основании метода переменных параметров упругости, позволяющего решать задачу о раздаче в упруго-пластической постановке. Кроме того, построенная модель учитывает сжимаемость материала при упругом деформировании. По результатам численного расчета представлено распределение меридиональных и окружных напряжений и логарифмических деформаций, а также распределение логарифмических деформаций по толщине стенки заготовки. Проведена оценка контактного давления при обжиме, отмечается уменьшение относительной толщины заготовки по длине при раздаче. Сходимость итерационного процесса расчета методом переменных параметров упругости оценивалась по положению интенсивностей напряжений и интенсивностей логарифмических деформаций относительно диаграммы деформирования материала. Предложенное решение задачи о раздаче трубных заготовок может найти применение в области авиастроения при разработке тонкостенных оболочечных конструкций авиационного назначения.

**Ключевые слова:** метод переменных параметров упругости, раздача трубы, нелинейная пластичность, переменная толщина стенки, контактное трение, криволинейная матрица

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке «Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации» в рамках стипендии по проекту СП-2200.2022.5 «Разработка моделей и алгоритмов расчёта пластического формообразования заготовок штамповочного производства».

**Для цитирования:** Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Марьин С.Б. Численно-аналитическая модель напряжённо-деформированного состояния при раздате тонкостенных трубных заготовок в криволинейной осесимметричной матрице // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176840>

Original article

## **NUMERICAL AND ANALYTICAL MODEL OF THE STRESS-STRAIN STATE DURING THE EXPANSION OF THIN-WALLED PIPE BLANKS IN A CURVED AXISYMMETRIC MATRIX**

**Sergey I. Feoktistov<sup>1</sup>, Ivan K. Andrianov<sup>2</sup>✉, Sergey B. Maryin<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Komsomolsk-na-Amure State University,

Komsomolsk-na-Amure, Russia

<sup>1</sup>[serg\\_feo@mail.ru](mailto:serg_feo@mail.ru)

<sup>2</sup>[ivan\\_andrianov\\_90@mail.ru](mailto:ivan_andrianov_90@mail.ru)✉

<sup>3</sup>[maryinsb@mail.ru](mailto:maryinsb@mail.ru)

**Abstract.** The study considers numerical and analytical modeling of the stress-strain state and force characteristics during expansion of the thin-walled pipe blanks in a

curved axisymmetric matrix. The equilibrium equations of the momentless theory of thin axisymmetric shells with regard to the nonlinear plasticity, changes in wall thickness and contact friction are employed when developing the model. The computations are based on the numerical method of variable elasticity parameters, which allows determining stresses and strains; the thickness distribution in the meridian section; the amount of contact pressure, as well as to plot the change in the force distribution depending on the application point displacement of the force relative to the matrix. A mathematical model for the stress-strain state of pipe blanks estimating during expansion is developed for a matrix, which profile is described by an arbitrary function. The numerical technique for the stress-strain state computing is based on the variable elasticity parameters method, which allows solving the problem of expansion in an elastic-plastic formulation. Besides, the developed model accounts for the material compressibility during elastic strain. Based on the numerical computing results, the distribution of meridian and circumferential stresses and logarithmic strains, as well as the of logarithmic strains distribution over the workpiece wall thickness are presented. An assessment of the contact pressure during crimping is performed, a decrease in the relative thickness of the workpiece along the length during distribution is noted herewith. The iterative computation process convergence by the of variable elasticity parameters method was estimated by the position of stress intensities and logarithmic strain intensities relative to the deformation diagram of the material. The proposed problem solution of the pipe blanks expansion may find application in the field of aircraft engineering in the development of thin-walled shell structures for aviation purposes.

**Keywords:** method of variable elasticity parameters, pipe expansion, nonlinear plasticity, variable wall thickness, contact friction, curved matrix

**Funding:** the research was carried out with the financial support of the "Council for Grants of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists and state support of leading scientific schools of the Russian Federation" within the framework of a scholarship under the project SP-2200.2022.5 "Development of models and algorithms for calculating plastic shaping of blanks of stamping production".

**For citation:** Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Maryin S.B. Numerical and analytical model of the stress-strain state during the expansion of thin-walled pipe blanks in a curved axisymmetric matrix. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176840>

## Введение

При разработке технологических процессов деформирования тонкостенных труб раздачей одной из важнейших задач является определение напряженно-деформированного состояния, что позволяет определить силовые характеристики процесса, технологические возможности и рассчитать изменение толщины заготовки. Вопросы раздачи трубных заготовок широко рассматривались в работах [1-4]. Проблемы влияния механической анизотропии заготовок на процесс раздачи исследовались в работе [5]. Один из важных вопросов в процессе раздачи заготовок связан с оценкой их предельного

состояния, поскольку при увеличении диаметра заготовки возможно появление неустойчивого деформирования. Проблема анализа предельного состояния листовых заготовок в процессах формоизменения на основании диаграмм предельного деформирования рассмотрена в работе [6]. Ввиду сложности геометрической формы матриц при формообразовании различных тонкостенных заготовок распространение получил метод конечных элементов при оценке деформаций и остаточных напряжений [7-9]. Экспериментальные исследования по формоизменению трубных заготовок рассматривались в работе [10]. Кроме того, следует отметить, что новые технологии в области листовой штамповки применительно к деталям авиастроительного производства рассмотрены в трудах [11-14].

В рамках данного исследования рассмотрены тонкостенные оболочки. Тонкостенными будем считать те бесшовные трубы, у которых толщина стенки не превышает 0,1 радиуса срединной поверхности трубы. В большинстве случаев эти задачи решаются для простейшей формы оснастки, когда форма матрицы или пуансона является конической или образующая их рабочий контур имеет постоянный радиус кривизны [15-20]. В большинстве случаев рассматривается идеально жесткопластический материал, материал с линейным упрочнением, а также пренебрегают изменением толщины заготовки в процессе деформирования.

Будем рассматривать криволинейную матрицу, у которой образующая её рабочий контур задаётся произвольной функцией. Решение аналогичной задачи было представлено в работе [21], где моделирование процесса раздачи трубы

выполняется численным интегрированием уравнений равновесия методом Рунге-Кутты второго порядка. В основе нашей расчётно-аналитической модели определения напряжённо-деформированного состояния лежит метод переменных параметров упругости [17, 22], который позволяет учитывать не только изменение толщины в процессе деформирования, но и нелинейную пластичность, анизотропию и сжимаемость материала.

### **Методика исследования**

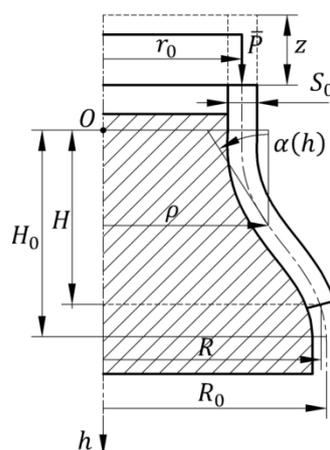
Методика исследования строится с использованием метода переменных параметров упругости, основанного на уравнениях и допущениях деформационной теории пластичности. В качестве меры деформаций будем использовать логарифмические деформации, которые определяются как интеграл приращения деформаций и обладают свойством аддитивности, что позволяет говорить не о малых, а о конечных деформациях. Для применения метода переменных параметров упругости необходимым условием является аналитическое выражение, определяющее зависимость интенсивности напряжений от интенсивности логарифмических деформаций. Анализ существующих методов аппроксимации диаграмм деформирования, предлагаемых Н.Н. Малининым [17] и др. исследователями [23, 24] показал, что достаточно часто данная кривая для алюминиевых и титановых сплавов хорошо аппроксимируется либо степенной зависимостью  $\sigma_i = K e_i^n$ , либо линейно-степенной:

$$\sigma_i = \begin{cases} 3Ge_i & \text{при } e_i \leq e_{iT} \\ Ke_i^n & \text{при } e_i > e_{iT} \end{cases} \quad (1)$$

где  $G$  – модуль упругости второго рода;  $e_{iT}$  – значение интенсивности логарифмических деформаций, соответствующее пределу текучести при переходе линейной зависимости в степенную;  $K$  и  $n$  – параметры степенной функции.

Параметры  $K$  и  $n$  определяются на основании основных механических характеристик материала по диаграмме деформирования, полученной при испытании образцов на разрыв.

Таким образом, будем рассматривать процесс деформирования тонкостенных труб с использованием оснастки сложной формы. На рис. 1 изображена схема раздачи. Как видно, в общем случае, кривая образующая рабочий контур матрицы и пуансона может иметь знакопеременный радиус кривизны.



**Рис.1.** Схемы раздачи трубных заготовок с использованием криволинейной осесимметричной оснастки

Как показано в работе [25], для всех случаев деформирования трубных заготовок, с использованием осесимметричной оснастки, уравнение равновесия согласно безмоментной теории оболочек, можно представить в виде выражения (2). Нужно учитывать, что  $\alpha$  – угол между касательной к элементу оболочки и её осью симметрии для раздачи отсчитывается по против часовой стрелки (рис. 1):

$$\frac{d(\sigma_m S)}{d\rho} = \frac{\sigma_\theta (1 + f_{\text{тр}} \operatorname{ctg} \alpha) - \sigma_m (1 + f_{\text{тр}} \rho \frac{d\alpha}{d\rho})}{\rho} S, \quad (2)$$

где  $\rho$  – радиус окружности срединной поверхности оболочки в сечении перпендикулярном оси оболочки;  $\sigma_m$  – меридиональное главное нормальное напряжение;  $\sigma_\theta$  – окружное главное нормальное напряжение;  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $S$  – толщина оболочки;  $\alpha = \alpha(\rho)$  – переменный угол между касательной к элементу оболочки и её осью симметрии, зависящий от  $\rho$ .

Интегрируя уравнение (2), а также используя уравнения связи напряжений и деформаций для плоского напряженного состояния в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{E^*}{(1 - \mu^{*2})} (e_m + \mu^* e_\theta); \\ \sigma_\theta &= \frac{E^*}{(1 - \mu^{*2})} (e_\theta + \mu^* e_m), \end{aligned} \right\}$$

и учитывая, что деформируемый край трубы свободен, можно получить интегральное уравнение равновесия в деформациях [24]:

$$e_m = -\mu^* e_\theta + \frac{(1 - \mu^{*2})}{E^* S \rho \exp(f_{\text{тр}} \alpha)}.$$

$$\cdot \left[ \int_R^\rho \frac{E^* S (1 + f_{\text{тр}} \operatorname{ctg} \alpha) \exp(f_{\text{тр}} \alpha)}{(1 - \mu^{*2})} (e_\theta + \mu^* e_m) d\rho \right], \quad (3)$$

где  $e_m$  – меридиональная логарифмическая (истинная) деформация;  $e_\theta$  – окружная логарифмическая (истинная) деформация;  $E^*$  и  $\mu^*$  – переменные параметры упругости;  $R$  – радиус деформируемого наружного края трубы (см. рис. 1).

Переменные параметры упругости определяются выражениями [17, 22]:

$$E^* = \frac{E_{\text{сек}}}{1 + \frac{1-2\mu}{3E} E_{\text{сек}}};$$

$$\mu^* = \frac{\frac{1}{2} - \frac{1-2\mu}{3E} E_{\text{сек}}}{1 + \frac{1-2\mu}{3E} E_{\text{сек}}},$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E_{\text{сек}} = \sigma_i / e_i$  – секущий модуль.

Рассмотрим процессы раздачи в общем случае, когда кривая, образующая рабочий контур матрицы, задаётся произвольной функцией, определяющей положение деформируемого элемента по радиусу в зависимости от его положения по длине деформируемой части трубы  $\rho = \rho(h)$  (см. рис 1), где  $h$  – координата, отсчитываемая от точки на оси симметрии, соответствующей краю криволинейного участка матрицы, и направленная вдоль оси симметрии в сторону движения заготовки.

В этом случае переменный угол между касательной к элементу оболочки и её осью симметрии, зависящий от  $h$ , можно определить как

$$\alpha = \alpha(h) = \arctan \left| \frac{d\rho}{dh} \right|. \quad (4)$$

Учитывая, что при увеличении  $h$  радиус при раздаче увеличивается, получим:

$$d\rho = \tan[\alpha(h)]dh.$$

Учитывая вышесказанное, а также то, что при раздаче окружные деформации являются известными и зависят только от положения исследуемой точки [26]

$$e_\theta = \ln \left( \frac{\rho(h)}{r_0} \right),$$

уравнение (3) можно записать в виде

$$e_m = -\mu^* \ln \left( \frac{\rho(h)}{r_0} \right) + \frac{(1 - \mu^{*2})}{E^* S \rho(h) \exp(f_{\text{тр}} \alpha(h))} \cdot \left[ \int_H^h \frac{E^* S (\operatorname{tg} [\alpha(h)] + f_{\text{тр}}) \exp(f_{\text{тр}} \alpha(h))}{(1 - \mu^{*2})} \left( \ln \left( \frac{\rho(h)}{r_0} \right) + \mu^* e_m \right) dh \right], \quad (5)$$

где  $H$  – положение края деформируемого участка трубы (см. рис. 1).

Для расчёта матрицы на прочность или выбора необходимого вида смазки, иногда нужно знать величину контактного давления, которое можно определить, используя уравнение Лапласа для раздачи:

$$\frac{q}{S} = \left( \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} - \frac{\sigma_m}{R_m} \right), \quad (6)$$

где  $\sigma_m$  – меридиональное главное напряжение;  $\sigma_\theta$  – окружное главное напряжение;  $R_\theta; R_m$  – радиусы кривизны срединных поверхностей в ортогональном и меридиональном сечениях согласно [22].

Радиусы кривизны будем определять на основании профиля матрицы, описываемого функцией  $\rho = \rho(h)$ , тогда:

$$R_m = \left( \sqrt{1 + \left( \frac{d\rho}{dh} \right)^2} \right)^3 \left( \frac{d^2\rho}{dh^2} \right)^{-1},$$
$$R_\theta = \frac{\rho}{\cos \alpha(h)}.$$

Подробный порядок решения задачи об определении напряжённо-деформированного состояния методом переменных параметров упругости с использованием интегральных уравнений равновесия для цилиндрических труб представлен в работе [25].

## Результаты исследования

Рассмотрим пример решения интегрального уравнения (5) для решения конкретной задачи. Для получения знакопеременного радиуса кривизны, образующей рабочий контур матрицы, возьмём синусоидальную тригонометрическую функцию, которая охватывает полупериод синусоиды, обеспечивая плавный вход цилиндрической трубы в зону деформирования и плавный выход с образованием цилиндра другого радиуса. Для задачи такую функцию можно записать как

$$\rho(h) = \frac{(R_0 - r_0)}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{h}{H_0} \pi\right) \right] + r_0, \quad (7)$$

где (см. рис.1)  $r_0$  – радиус срединной поверхности трубы на входе в матрицу;  $R_0$  – радиус срединной поверхности трубы на выходе из матрицы;  $H_0$  – полная длина криволинейного участка матрицы, равная длине полупериода синусоидальной функции (7).

Так как уравнения (7) определяют геометрию срединной поверхности трубы при деформировании, то с достаточной степенью точности можно считать, что геометрию матрицы при раздаче можно получить, прибавляя поправку на половину толщины стенки трубы:

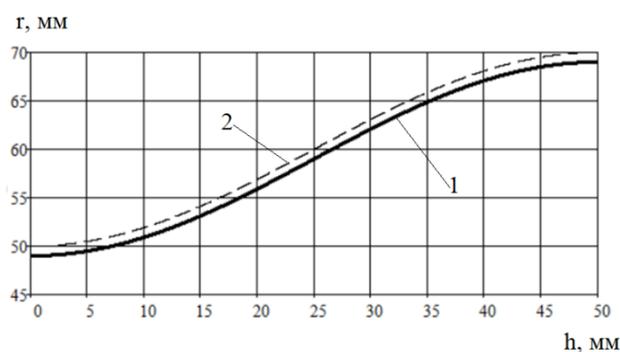
$$\rho_M(h) = \frac{(R_0 - r_0)}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{h}{H_0} \pi\right) \right] + r_0 + \frac{S_0}{2}, \quad (8)$$

где  $S_0$  – исходная толщина стенки трубы.

Угол между касательной к элементу оболочки и её осью симметрии (см. рис.1), определяем по формуле (4)

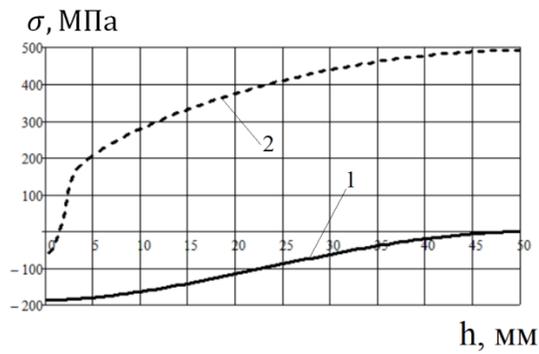
$$\alpha(h) = \arctan \left| \frac{(R_0 - r_0) \pi}{2 H_0} \sin\left(\frac{h}{H_0} \pi\right) \right|. \quad (9)$$

На рис. 2 показаны кривые, определяющие геометрию матрицы и зоны деформирования трубной заготовки по срединной поверхности при раздаче, построенные по уравнениям (7) и (8).

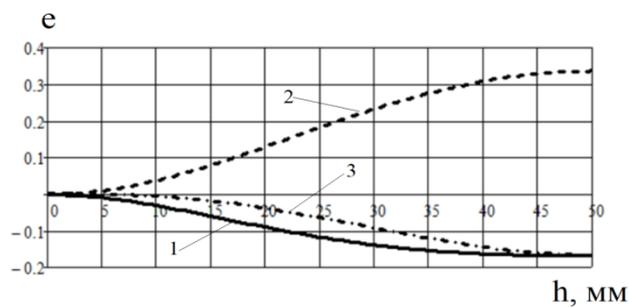


**Рис. 2.** Геометрия матрицы и зоны деформирования трубной заготовки по срединной поверхности при раздаче: 1 – геометрия матрицы; 2 – геометрия срединной поверхности ( $R_0 = 70$  мм;  $r_0 = 50$  мм;  $S_0 = 2$  мм;  $H_0 = 50$  мм)

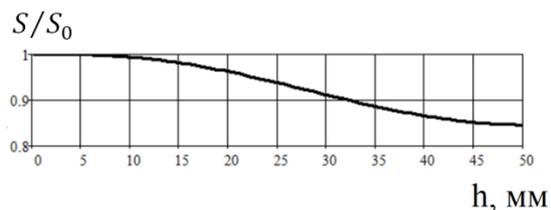
На рис. 3, 4, 5 и 6 представлены результаты определения напряжённо-деформированного состояния трубы при раздаче в криволинейной осесимметричной матрице, геометрия которой представлена на рис. 2. Радиус срединной поверхности трубной заготовки  $R_0$  принимался равным 50 мм, толщина  $S_0 = 2$  мм. Для материала Д16 механические свойства были заданы в соответствии со стандартом ГОСТ 18482-2018 [27] и справочными данными алюминиевых сплавов: предел прочности  $\sigma_B = 390$  МПа; условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 255$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 12\%$ ; модуль упругости  $E = 72000$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,33$ . Диаграмма деформирования в соответствии с принятой линейно-степенной аппроксимацией (1), была построена по методике, изложенной в работах [28, 29].



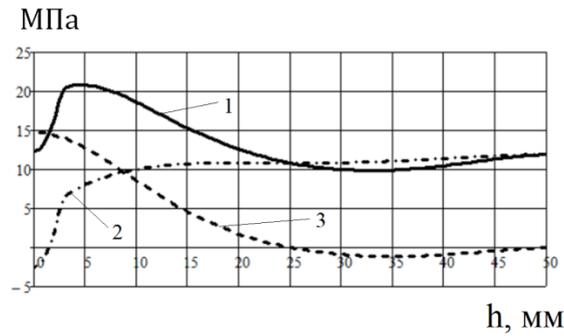
**Рис. 3.** Напряжённое состояние трубы при раздаче в криволинейной осесимметричной матрице: 1 – меридиональные напряжения  $\sigma_m$ ; 2 – окружные напряжения  $\sigma_\theta$ .



**Рис. 4.** Деформированное состояние трубы при раздаче в криволинейной осесимметричной матрице: 1 – меридиональная логарифмическая деформация  $e_m$ ; 2 – окружная логарифмическая деформация  $e_\theta$ ; 3 – логарифмическая деформация по толщине  $e_z$

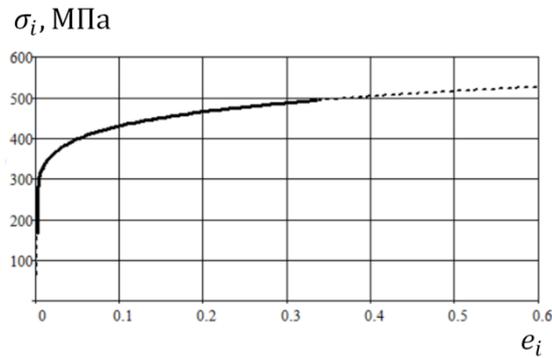


**Рис. 5.** Изменение относительной толщины стенки трубы при раздаче в криволинейной осесимметричной матрице



**Рис. 6.** Изменение контактного давления при раздаче в криволинейной осесимметричной матрице: 1 – полное контактное давление  $q$ ; 2 – составляющая контактного давления  $q_{\theta}$  от действия окружного напряжения; 3 – составляющая контактного давления  $q_m$  от действия меридионального напряжения

Оценка точности решения методом переменных параметров упругости осуществляется сравнением положения значений интенсивностей напряжений и деформаций, определяющих напряженно-деформированное состояние, на диаграмме деформирования. На рис. 7 видно, что все точки, характеризующие напряженно-деформированное состояние при раздаче, лежат на диаграмме деформирования. Это означает, что процесс последовательных приближений сходится и получено решение с заданной точностью.



**Рис. 7.** Положение значений интенсивностей напряжений и деформаций, определяющих напряженно-деформированное состояние трубы при раздаче, на диаграмме деформирования

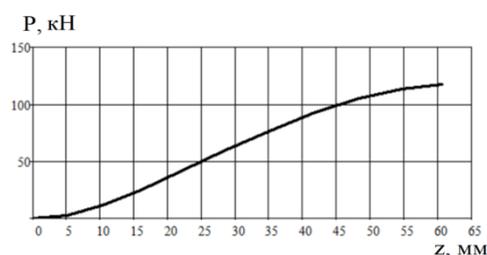
Согласно рис. 3-7 представлены характеристики напряжённо-деформированного состояния трубы при раздаче для случая когда труба проходит всю зону деформирования и область интегрирования определяется от  $H_0$  до 0. Если рассматривать процесс деформирования поэтапно, изменяя положение деформируемого края трубы  $H$  в сторону увеличения до  $H_0$ , то можно определить изменение технологических параметров, таких как усилие деформирования на протяжении прохождения всего процесса. Перемещение  $Z$  точки приложения усилия деформирования связано с положением деформируемого края заготовки  $H$  на основании условия равенства смещённых объёмов

$$Z(H) = \frac{1}{r_0 S_0} \int_0^H \frac{\rho(h)s(h)}{\cos \alpha(h)} dh.$$

Кроме того, деформирующее усилие при раздаче можно оценить на основании максимального меридионального напряжения  $\sigma_{m|h=0}(Z)$  в точке 0 в зависимости от перемещения  $Z$

$$P(Z) = 2\pi r_0 S_0 |\sigma_{m|h=0}(Z)|.$$

На рис. 8 представлен график изменение усилия деформирования при раздаче трубы в криволинейной осесимметричной матрице от перемещения точки приложения усилия.



**Рис. 8.** Изменение усилия деформирования при раздаче трубы в криволинейной осесимметричной матрице от перемещения точки приложения усилия

## Заключение

Таким образом, в исследовании предложена численно-аналитическая модель расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенной заготовки при раздаче в криволинейной осесимметричной матрице. На основании метода переменных параметров упругости построенная методика позволяет оценить изменение усилия в зависимости от перемещения точки приложения усилия, толщины заготовки, величину контактного трения с учётом нелинейного закона упрочнения материала. Данная модель может быть

использована для расчетов процесса раздачи в осесимметричных матрицах различной формы, где профиль образован дугами окружностей разного радиуса на вогнутом и выпуклом участке, имеющих общую касательную в точке перегиба, или конический профиль с выпуклым участком на входе в матрицу и вогнутым на выходе. Также следует отметить, что в рамках данного исследования не рассматривалось упругое последствие заготовки после снятия нагрузки, что является проблемой для отдельного исследования.

### **Список источников**

1. Sosenushkin E., Yanovskaya E., Smolovich I., Khachatryan D., Kinderov V. Expansion of pipe blanks // Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, pp. 239-243. DOI: [10.3103/S1068798X16030175](https://doi.org/10.3103/S1068798X16030175)
2. Lebedinsky I.N. Deformation during free dispensing of a hollow workpiece // Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure, 2016, no. 1, pp. 7-9.
3. Cao Bo, Iwamoto Takeshi. A strength prediction of joints by Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloy through strain monitoring during pre-processes including diameter expansion and tightening by heating // Engineering Fracture Mechanics, 2023, vol. 284, pp. 109234. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2023.109234](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109234)
4. Zhao Pengjing, Yang Yo-Lun, Gao Peng, Jiao Jingpin. Research on stamping forming prediction of aluminum alloy sheet based on RBF neural network // Journal of Physics: Conference Series, 2022, vol. 2396, pp. 012038. DOI: [10.1088/1742-6596/2396/1/012038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2396/1/012038)

5. Gryazev M., Pasyukov A., Larin S. Effect of Initial Mechanical Anisotropy of the Pipe Blank in Expansion by a Conical Punch // Russian Engineering Research, 2018, vol. 38, pp. 371-375. DOI: [10.3103/S1068798X1805009X](https://doi.org/10.3103/S1068798X1805009X)
6. Feoktistov S., Andrianov I. Construction of Forming Limit Diagram for Sheet Blanks from Aviation Aluminum Alloys // Advanced Engineering Research, 2023, vol. 23, pp. 7-16. DOI: [10.23947/2687-1653-2023-23-1-7-16](https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-7-16)
7. Han Z.R., Zhang L.Y., Huang C.Y. Optimum sheet metal blank design by finite element increment method // Journal of plasticity engineering, 2007, vol. 14(6), pp. 59-62.
8. Lee C.H., Huh H. Blank design and strain estimates for sheet metal forming processes by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation // Journal of Materials processing Technology, 1998, vol. 82 (1), pp. 145-155. DOI: [10.1016/s0924-0136\(98\)00034-x](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(98)00034-x)
9. Kumar Dharmesh, Zhigang Liu, Jirathearanat Suwat, Anantharajan Senthil Kumar. Investigation of Residual Stresses Induced by Incremental Sheet Forming and Stamping in Aluminum Alloys // Journal of Materials Engineering and Performance, 2022. DOI: [10.1007/s11665-022-07304-3](https://doi.org/10.1007/s11665-022-07304-3)
10. Kaljuzny V., Oleksandrenko Y., Kulikov I. The experiment-calculated analysis of open bulging of tubular workpiece // Journal of Mechanical Engineering, 2014, no. 1 (70), pp. 63-68.
11. Ковалевич М.В., Климова А.А. Совмещение традиционных операций листовой штамповки и пневмотермической формовки в режиме

сверхпластичности для изготовления изделий авиационной техники // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14150>

12. Болховитин М.С., Королев Н.Н., Монахова В.П. Повышение эффективности управления технологическим процессом точной штамповки при изготовлении лопаток компрессора ГТД // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57706>

13. Сапожникова Ю.А., Черников Д.Г. Гибридные и комбинированные технологии в процессах обработки металлов давлением // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=25507>

14. Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Джоздани М.С., Хорошко А.Л. Изготовление листовых окантовок люков летательных аппаратов магнитно-импульсным способом и моделирование с использованием САПР // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84585>

15. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.

16. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

17. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.

18. Ершов В.И., Попов О.В., Чумадин А.С. и др. Листовая штамповка: Расчёт технологических параметров: Справочник. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 516 с.

19. Яковлев С.С., Бессмертная Ю.В., Платонов В.И. Анализ влияния технологических параметров операций обжима и раздачи в изотермических

условиях на силовые режимы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11. Ч. 1. С. 10-19.

20. Грязев М.В., Ларин С.Н. Подход к разработке математической модели процесса раздачи трубы коническим пуансоном // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 4-2 (324). С. 12-17.

21. Непершин Р.И. Раздача тонкостенной трубы криволинейным жёстким пуансоном // Вестник МГТУ «Станкин». 2009. № 4 (8). С. 54-60.

22. Биргер И.А. Круглые пластинки и оболочки вращения. – М.: Оборонгиз, 1961. – 368 с.

23. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник - М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.

24. Чумадин А.С. Теория и расчеты процессов листовой штамповки (для инженеров). – М.: Экссервис «ВИП», 2014. – 216 с.

25. Феоктистов С.И., Андрианов И.К. Вывод интегральных уравнений деформирования трубных заготовок с использованием осесимметричной оснастки // Материалы VI Дальневосточной конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении»: сборник трудов. (Комсомольск-на-Амуре, 5-7 октября 2022). – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 204-210.

26. Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Лин Тхет. Определение напряжённо-деформированного состояния при формоизменении цилиндрических труб с

использованием конической оснастки // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 3 (59). С. 4-11.

DOI: [10.17084/20764359-2022-59-4](https://doi.org/10.17084/20764359-2022-59-4)

27. ГОСТ 18482-2018. Трубы прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.

28. Феоктистов С.И., Андрианов И.К., Лин Тхет. Аппроксимация диаграммы деформирования металла в области упругопластических деформаций с нелинейным упрочнением // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 7 (63). С. 8-13. DOI:

[10.17084/20764359-2022-63-8](https://doi.org/10.17084/20764359-2022-63-8)

29. Андрианов И.К., Феоктистов С.И. Основы построения диаграмм деформирования с учётом сжимаемости материала и эффекта Баушингера. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2022. – 103 с.

## References

1. Sosenushkin E., Yanovskaya E., Smolovich I., Khachatryan D., Kinderov V. Expansion of pipe blanks, *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, pp. 239-243.

DOI: [10.3103/S1068798X16030175](https://doi.org/10.3103/S1068798X16030175)

2. Lebedinsky I.N. Deformation during free dispensing of a hollow workpiece, *Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure*, 2016, no. 1, pp. 7-9.

3. Cao Bo, Iwamoto Takeshi. A strength prediction of joints by Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloy through strain monitoring during pre-processes including diameter

expansion and tightening by heating, *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, vol. 284, pp. 109234. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2023.109234](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109234)

4. Zhao Pengjing, Yang Yo-Lun, Gao Peng, Jiao Jingpin. Research on stamping forming prediction of aluminum alloy sheet based on RBF neural network, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2396, pp. 012038. DOI: [10.1088/1742-6596/2396/1/012038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2396/1/012038)

5. Gryazev M., Pasyukov A., Larin S. Effect of Initial Mechanical Anisotropy of the Pipe Blank in Expansion by a Conical Punch, *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, pp. 371-375. DOI: [10.3103/S1068798X1805009X](https://doi.org/10.3103/S1068798X1805009X)

6. Feoktistov S., Andrianov I. Construction of Forming Limit Diagram for Sheet Blanks from Aviation Aluminum Alloys, *Advanced Engineering Research*, 2023, vol. 23, pp. 7-16. DOI: [10.23947/2687-1653-2023-23-1-7-16](https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-7-16)

7. Han Z.R., Zhang L.Y., Huang C.Y. Optimum sheet metal blank design by finite element increment method, *Journal of plasticity engineering*, 2007, vol. 14(6), pp. 59-62.

8. Lee C.H., Huh H. Blank design and strain estimates for sheet metal forming processes by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation, *Journal of Materials processing Technology*, 1998, vol. 82 (1), pp. 145-155. DOI: [10.1016/s0924-0136\(98\)00034-x](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(98)00034-x)

9. Kumar Dharmesh, Zhigang Liu, Jirathearanat Suwat, Anantharajan Senthil Kumar. Investigation of Residual Stresses Induced by Incremental Sheet Forming and Stamping in Aluminum Alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. DOI: [10.1007/s11665-022-07304-3](https://doi.org/10.1007/s11665-022-07304-3)

10. Kaljuzny V., Oleksandrenko Y., Kulikov I. The experiment-calculated analysis of open bulging of tubular workpiece, *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, no. 1 (70), pp. 63-68.
11. Kovalevich M.V., Klimova A.A. *Trudy MAI*, 2010, no. 38. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14150>
12. Bolkhovitin M.S., Korolev N.N., Monakhova V.P. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57706>
13. Sapozhnikova Yu.A., Chernikov D.G. *Trudy MAI*, 2011, no. 45. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25507>
14. Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Dzhodzani M.S., Khoroshko A.L. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84585>
15. Gorbunov M.N. *Tekhnologiya zagotovitel'no-shtampovochnykh robot v proizvodstve samoletov* (Technology of procurement and stamping works in the production of aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 224 p.
16. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* (Theory of metal processing by pressure), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 423 p.
17. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* (Applied theory of plasticity and creep), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 399 p.
18. Ershov V.I., Popov O.V., Chumadin A.S. et al. *Listovaya shtampovka: Raschet tekhnologicheskikh parametrov* (Sheet stamping: Calculation of technological parameters), Moscow, Izd-vo MAI, 1999, 516 p.
19. Yakovlev S.S., Bessmertnaya Yu.V., Platonov V.I. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 11, Ch. 1, pp. 10-19.

20. Gryazev M.V., Larin S.N. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2017, no. 4-2 (324), pp. 12-17.
21. Nepershin R.I. *Vestnik MGTU «Stankin»*, 2009, no. 4 (8), pp. 54-60.
22. Birger I.A. *Kruglye plastinki i obolochki vrashcheniya* (Round plates and shells of rotation), Moscow, Oborongiz, 1961, 368 p.
23. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* (Resistance to plastic deformation of metals and alloys), Moscow, Metallurgiya, 1983, 352 p.
24. Chumadin A.S. *Teoriya i raschety protsessov listovoi shtampovki (dlya inzhenerov)* (Theory and calculations of sheet stamping processes (for engineers)), Moscow, Eksservis «VIP», 2014, 216 p.
25. Feoktistov S.I., Andrianov I.K. *Materialy VI Dal'nevostochnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Fundamental'nye i prikladnye zadachi mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela i progressivnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii»*: sbornik trudov. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi universitet, 2022, pp. 204-210.
26. Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Lin Tkhet. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, no. 3 (59), pp. 4-11. DOI: [10.17084/20764359-2022-59-4](https://doi.org/10.17084/20764359-2022-59-4)
27. *GOST 18482-2018. Truby pressovannye iz alyuminiya i alyuminievykh splavov. Tekhnicheskie usloviya (GOST 18482-2018. Pressed pipes made of aluminum and aluminum alloys. Technical specifications)*, Moscow, Standartinform, 2018, 20 p.

28. Feoktistov S.I., Andrianov I.K., Lin Tkhet. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, no. 7 (63), pp. 8-13. DOI:

[10.17084/20764359-2022-63-8](https://doi.org/10.17084/20764359-2022-63-8)

29. Andrianov I.K., Feoktistov S.I. *Osnovy postroeniya diagramm deformirovaniya s uchetom szhimaemosti materiala i effekta Baushingera* (Fundamentals of constructing deformation diagrams taking into account the compressibility of the material and the Bauschinger effect), Komsomol'sk-na-Amure, Izd-vo KnAGU, 2022, 103 p.

Статья поступила в редакцию 08.09.2023

Одобрена после рецензирования 15.09.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 08.09.2023; approved after reviewing on 15.09.2023; accepted for publication on 27.10.2023