



Научная статья

УДК 621.7.043:629.73.063

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186673>

EDN: <https://www.elibrary.ru/DWCZUF>

## Моделирование напряженно-деформированного состояния при упруго-пластическом изгибе листовой заготовки и оценка кривизны в процессе ее упругой разгрузки

Сергей Иванович Феоктистов<sup>1</sup>, Сергей Борисович Марьин<sup>2</sup>, Иван Владимирович Лозовский<sup>3✉</sup>,  
Андрей Константинович Кравченко<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Комсомольский-на-Амуре государственный университет (КнАГУ),  
Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация

<sup>1</sup>serg\_feo@mail.ru

<sup>2</sup>maryinsb@mail.ru

<sup>3</sup>Lozovcky@yandex.ru✉

<sup>4</sup>ek74@list.ru

**Аннотация.** Авторами проведено комплексное исследование, направленное на изучение напряженно-деформированного состояния листовой заготовки в условиях упруго-пластического изгиба и оценку изменения кривизны при последующей упругой разгрузке материала, состоящее из следующих этапов. С помощью моделирования был проведен численный эксперимент, результаты которого позволили получить уравнение, отражающее зависимость между моментом, возникающим при изгибе листовой заготовки с одновременным радиальным сжатием, и изменением кривизны нейтрального слоя заготовки в процессе ее упругой разгрузки. Полученное соотношение дает возможность рассчитать величину остаточных напряжений и точное значение конечной кривизны готовой детали. В рамках автоматизации процессов расчета авторами была разработана программа, позволяющая определять оптимальный радиус заготовки и прогнозировать распределение нормальных напряжений после снятия деформирующей нагрузки. Результаты теоретического анализа были использованы для проектирования специальной технологической оснастки, предназначеннной для серийного производства деталей гидrogазовых систем летательных аппаратов цилиндрической формы методом штамповки в эластосыпучей среде. Применение разработанной оснастки обеспечивает снижение затрат на изготовление, высокую степень формообразования, минимальный эффект пружинения. Для подтверждения корректности предложенных моделей и решений был изготовлен опытный штамп и проведен эксперимент по свертыванию трубы. Результаты экспериментальных исследований подтвердили хорошую сходимость расчетных и реальных значений основных показателей качества изготавливаемых деталей.

**Ключевые слова:** изготовление труб и профилей, летательные аппараты, свертывание листовой заготовки, упруго-пластический изгиб, эластосыпучая среда, моделирование напряженно-деформированного состояния

**Для цитирования:** Феоктистов С.И., Марьин С.Б., Лозовский И.В., Кравченко А.К. Моделирование напряженно-деформированного состояния при упруго-пластическом изгибе листовой заготовки и оценка кривизны в процессе ее упругой разгрузки // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 112-125. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186673>

Original article

## The Sheet Billet Stress-Strain State Modeling at the Elastic-Plastic Bending and Curvature Evaluation While Its Elastic Unloading

Sergey I. Feoktistov<sup>1</sup>, Sergey B. Maryin<sup>2</sup>, Ivan V. Lozovskiy<sup>3✉</sup>, Andrey K. Kravchenko<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

<sup>1</sup> serg\_feo@mail.ru

<sup>2</sup> maryinsb@mail.ru

<sup>3</sup> Lozovcky@yandex.ru✉

<sup>4</sup> ek74@list.ru

### Abstract

The processes of the sheet blanks curtailing in an elasto-loose medium to obtain single-seam thin-walled tubular blanks of non-standard cross section for the aircraft hydro-gas systems is of great interest while aircraft hydro-gas systems elements manufacturing. When solving technological problems, one of the urgent problems consists in geometry determining of the deforming rigging with regard to the blank springing-back and obtaining the part of the required shape. To solve this problem, it is necessary to determine the blank stress-strain state while bending, which will allow determining the final geometry of the part after the load removing.

When analyzing the deformed state of a sheet blank while bending with radial compression, the flat section hypothesis was used, according to which the original flat sections of the blank are being sustained flat during deformation. Based on this hypothesis, the law of relative tangential deformations distribution along the height of the billet section was determined.

Equations that link main deformations with the main stresses in the cylindrical coordinate system were obtained by the hypotheses of the deformation theory of plasticity.

The article presents the relationship between relative displacement of the neutral layer and radial compression value at different internal bending radii. It was found on their basis that the value of the neutral layer displacement increased and varies proportionally with the increase of the radial compression value. Moreover, the bigger the bending radius the greater the relative displacement, which can reach significant values.

The authors considered the bending moment variation dependence on the radial compression value, on which basis an inference may be drawn that the value of the blank sprinback decreased with the radial compression value increase.

Thus, the equations, allowing determine the stress-strain state of the blank at bending by the moment with radial compression, were obtained.

The empirical equation, which allows unambiguously link the bending moment, acting at the bending with radial compression and the curvature change of the neutral layer at the elastic unloading. This allowed dedermining the residual curvature of the blank. The dependence of error of the unloading bending moment determining herewith on the radial compression value at various internal radii was hundredth of a percent independently from the radial compression forcing. This error at that tends to zero with the radius increase.

Thus, it can be concluded that the deformation (bending) of the blank is caused by creating a bending moment under the impact of the deformation force on the tooling. An extra compressive load is being created herewith from the side of the tooling. When the blank is compressed, extra normal stresses arise, which change the position of the neutral layer of normal bending stresses, changing thereby the overall picture of the stress-strain state. The distributed compressive load is being regarded constant along the bending length. This can be achieved with elastic or elasto-loose tooling.

To simulate the stress-strain state during elastic-plastic bending of the sheet blank and evaluate the curvature during its elastic unloading, a program, fixed by a certificate of State registration, was elaborated. The program is intended for determining the blank radius and normal bending stresses distribution after the deformation force removing.

**Keywords:** pipes and profiles manufacturing, aircraft, sheet billet rolling-up, elastic-plastic bending, elastic-loose medium, stress-strain state modeling

**For citation:** Feoktistov S.I., Maryin S.B., Lozovskiy I.V., Kravchenko A.K. The Sheet Billet Stress-Strain State Modeling at the Elastic-Plastic Bending and Curvature Evaluation While Its Elastic Unloading. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):112-125. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186673>

**List of Figures**

- Fig. 1. The scheme of the sheet blank bending process by the rigid punch with radial compression: 1 – blank; 2 – cylindrical equipment;  $q_R$  – radial pressure on the workpiece of the working medium;  $q_r$  – radial pressure on the workpiece from the tooling side;  $R$  – the outer radius of the blank;  $r = r_{\text{rig}}$  – inner radius of the workpiece, equal to the tooling radius;  $s$  – the blank thickness;  $\theta = \theta_{\text{rig}}$  – workpiece bending angle equal to the tooling bending angle
- Fig. 2. The scheme of relative tangential deformations distribution through the thickness of the blank when bending with radial compression:  $\rho$  – the current radius of an arbitrary layer of the blank;  $h$  – position of the current layer of the blank in thickness;  $r_{q0}$  – radius of the neutral layer of the workpiece;  $h_{q0}$  – position of the neutral layer of the workpiece by thickness
- Fig. 3. The scheme of deformation curve approximation with the linear-power function
- Fig. 4. Diagrams of tangential stresses at various radial compression values:  $a - q_R = 0 \text{ MPa}$ ;  $b - q_R = 25 \text{ MPa}$ ;  $c - q_R = 50 \text{ MPa}$ ;  $d - q_R = 75 \text{ MPa}$
- Fig. 5. Diagrams of radial stresses at various radial compression values:  $a - q_R = 0 \text{ MPa}$ ;  $b - q_R = 25 \text{ MPa}$ ;  $c - q_R = 50 \text{ MPa}$ ;  $d - q_R = 75 \text{ MPa}$
- Fig. 6. The neutral layer relative displacement dependence on the radial compression value at various internal bending radii:  $a - r = 50 \text{ mm}$ ;  $b - r = 30 \text{ mm}$ ;  $c - r = 10 \text{ mm}$
- Fig. 7. Relative change of bending moment value depending on radial compression value at various internal bending radii:  $a - r = 50 \text{ mm}$ ;  $b - r = 30 \text{ mm}$ ;  $c - r = 10 \text{ mm}$
- Fig. 8. Elastic deformations effect on the bent part while unloading
- Fig. 9. Dependence of relative change in the neutral layer radius value during elastic unloading with radial compression on the radial compression value at various internal bending radii:  $a - r = 10 \text{ mm}$ ;  $b - r = 30 \text{ mm}$ ;  $c - r = 50 \text{ mm}$
- Fig. 10. Dependence of the bending unloading moment  $\bar{M}_{\text{unloading}} \phi$  determining by equation (31) error compared to the exact  $\bar{M}_{\text{ctrl}} \phi$  definition by the equation (30) on the radial compression at various internal bending radii:  $a - r_{\text{unloading}} = 10 \text{ mm}$ ;  $b - r_{\text{unloading}} = 20 \text{ mm}$ ;  $c - r_{\text{unloading}} = 30 \text{ mm}$ ;  $d - r_{\text{unloading}} = 50 \text{ mm}$
- Fig. 11. Die patterns in the initial state (a) and during stamping (b): 1 – punch holder; 2 – punch; 3 – sheet blank; 4 – rubber plate; 5 – ESS; 6 – insert; 7 – container
- Fig. 12. The experimental stamp layout (a); prototype (b)

**Введение**

Актуальной задачей современного авиа- и ракетостроения является разработка новых уникальных технологических процессов и специального оборудования для изготовления деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов, позволяющих снизить как себестоимость изготовления, так и массу деталей летательных аппаратов в целом. В основе изготовления таких деталей лежит технология формообразования листовых заготовок. Эта технология хорошо изучена благодаря трудам большого числа ученых [1–14], а также учебных и промышленных организаций. Теоретическими и практическими исследованиями напряженно-деформированного состояния материалов при пластическом деформировании, возникающем при гибке листовых заготовок, занимались многие российские и зарубежные ученые: А.С. Чумадин, Р.И. Тавасшерна, В.И. Ершов, М.Н. Горбунов, М.В. Сторожев, Е.А. Попов, В.Б. Юдаев, Г.А. Смирнов-Аляев, Н.Н. Малинина, А.А. Ильюшин, Е.И. Исаченков, А.Г. Овчинников, А.И. Целиков, Н.И. Могильный, А.Д. Матвеев, О.В. Попов, Б.Н. Марьин, С.И. Феоктистов, Ю.Н. Алексеев, В.И. Глазков, В.Г. Кононенко, Л.Г. Юдин, С.П. Яковлев, С. Колпакчиогли, Ш. Кобаяси, Э. Томсен и др. Комплексная методика оценки отклонений формы авиационных

изделий в зависимости от остаточных напряжений рассмотрена в работе [1]. Результаты исследования прочности и устойчивости овальных композитных цилиндрических оболочек при действии внешнего равномерного давления приведены в работе [2]. Совершенствованию технологии электромагнитной формовки патрубка с жалюзи применительно к трубчатым деталям летательных аппаратов посвящена статья [3].

Одновременно ученые оценивали качество получаемых указанными способами формообразования заготовок. Оценка технологичности конструкции изделия традиционными методами на основе 3D-модели изделия и компьютерного моделирования испытаний на одноосное растяжение образцов алюминиевого сплава приведена в работах [4, 5]. Моделирование кризисно-деформированного состояния тонкостенной трубчатой заготовки в процессе раздачи по жесткой матрице рассмотрено в работе [6]. Исследование упруго-пластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании и гибке с учетом эффекта пружинения представлено в работах [7, 8]. Оценка силовых параметров при штамповке методом выдавливания полых заготовок содержится в работе [9].

Проведенный анализ показал, что в производственных условиях, при развернутой номенклатуре

деталей, выполненных из листовых заготовок, а также при частой сменяемости или модернизации конечного изделия, особое значение приобретают процессы формообразования листовых заготовок с помощью эластичных и сыпучих сред [10, 14]. Штамповка эластичными средами листовых заготовок используется для изготовления деталей авиационной и ракетно-космической техники, выпускаемых серийно. Например, при производстве элементов гидrogазовых систем в виде прямой трубы она сваривается из двух отдельных полупатрубков. Недостатки данного способа изготовления: наличие большого количества технологической оснастки (матрица цинковая, пуансон свинцовый, макет стальной); наличие двух сварных швов. Это увеличивает массу детали и снижает надежность бортовой системы. Для снижения себестоимости изготовления оснастки, времени подготовки производства и массы самолета необходим более эффективный способ изготовления прямых труб нестандартного сечения.

В этом отношении большой интерес представляют процессы свертывания (гибки) листовых заготовок в эластосыпучей среде, для получения одношовных тонкостенных трубчатых заготовок нестандартного сечения для гидрогазовых систем летательных аппаратов. Отличительной особенностью такого способа, по сравнению со свободной гибкой, является то, что деформируемая заготовка в конце нагружения принимает форму деформирующей оснастки (пуансона) и на заготовку действуют усилия радиального сжатия со стороны эластосыпучей среды.

При решении технологических задач одной из важнейших проблем является определение геометрии деформирующей оснастки с учетом пружинения заготовки. Для решения этой проблемы необходимо определить напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе изгиба, что позволит определить конечную геометрию детали после снятия нагрузки.

Результаты решения этой задачи рассмотрены ниже.

## 1. Основные гипотезы и уравнения

Рассмотрим общий случай свертывания (изгиба) листовой заготовки по жесткому пуансону с радиальным сжатием, вызываемым давлением эластичной или эластосыпучей рабочей среды. На рис. 1 показана общая силовая схема такого процесса. При анализе процесса будем считать, что толщина листа при изгибе не меняется и радиальное давление на заготовку рабочей среды близко к гидростатическому, то есть не меняется по длине заготовки и направлено по нормали к наружной по-

верхности заготовки. Тогда из условия равновесия заготовки получим

$$q_r = \frac{R}{r} q_R.$$

При анализе деформированного состояния листовой заготовки при изгибе с радиальным сжатием воспользуемся гипотезой плоских сечений [15, 16], согласно которой исходные плоские сечения заготовки в процессе деформирования сохраняются плоскими. На основании этой гипотезы легко определить закон распределения относительных тангенциальных деформаций по высоте сечения заготовки.

На рис. 2 представлена схема распределения относительных тангенциальных деформаций по толщине заготовки при изгибе с радиальным сжатием.

Для любого волокна, характеризуемого текущим радиусом  $\rho$  (рис. 2), относительная тангенциальная деформация определится выражением

$$\varepsilon_\phi = \frac{\rho - r_{q0}}{r_{q0}},$$

где  $r_{q0}$  – радиус изгиба нейтрального слоя, т. е. слоя, конечная длина которого равна его исходной длине при изгибе с радиальным сжатием.

Логарифмические (истинные) тангенциальные деформации:

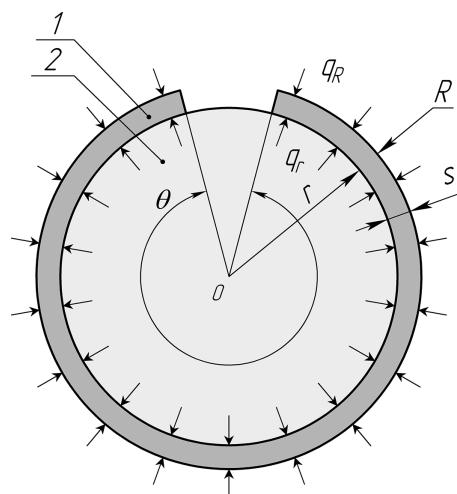


Рис. 1. Схема процесса гибки листовой заготовки по жесткому пуансону с радиальным сжатием:  
1 – заготовка; 2 – цилиндрическая оснастка;  
 $q_R$  – радиальное давление на заготовку рабочей среды;  $q_r$  – радиальное давление на заготовку со стороны оснастки;  
 $R$  – наружный радиус заготовки;  
 $r = r_{\text{осн}}$  – внутренний радиус заготовки, равный радиусу оснастки;  $s$  – толщина заготовки;  
 $\theta = \theta_{\text{осн}}$  – угол изгиба заготовки, равный углу изгиба по оснастке

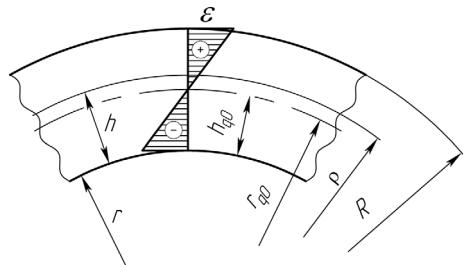


Рис. 2. Схема распределения относительных тангенциальных деформаций по толщине заготовки при изгибе с радиальным сжатием:  $\rho$  – текущий радиус произвольного слоя заготовки;  $h$  – положение текущего слоя заготовки по толщине;  $r_{q0}$  – радиус нейтрального слоя заготовки;  $h_{q0}$  – положение нейтрального слоя заготовки по толщине

$$e_\varphi = \ln(1 + \varepsilon_\varphi) = \ln \frac{\rho}{r_{q0}}. \quad (1)$$

Интенсивность логарифмических деформаций в цилиндрической системе координат в главных деформациях имеет вид

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_p - e_\varphi)^2 + (e_\varphi - e_z)^2 + (e_z - e_p)^2}, \quad (2)$$

где  $e_\varphi, e_p, e_z$  – логарифмические радиальные, тангенциальные, осевые деформации.

Выразим интенсивность деформаций через тангенциальные деформации.

При изгибе листовой заготовки деформация в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба, незначительна. Вследствие этого деформированное состояние заготовки можно рассматривать как плоское [17] и, при учете условия постоянства объема:  $-e_p + e_\varphi + e_z = 0$ , записать:  $e_p = e_\varphi; e_z = 0$ .

Подставляя полученные соотношения в (2), с учетом выражения (1) имеем:

$$e_i = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} e_\varphi = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r_{q0}}, \quad (3)$$

причем знак плюс соответствует растянутой в тангенциальном направлении области, а знак минус – сжатой.

Чтобы определить напряженное состояние, требуется решить дифференциальное уравнение равновесия, которое при гибке листовой заготовки имеет вид [17]

$$\frac{d\sigma_p}{d\rho} + \frac{\sigma_p - \sigma_\varphi}{\rho} = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma_p$  – радиальные напряжения, которые характеризуют давление продольных волокон друг на друга;  $\sigma_\varphi$  – тангенциальные напряжения, которые

возникают за счет растяжения (сжатия) продольных волокон при изгибе.

Интенсивность логарифмических напряжений в цилиндрической системе координат в главных напряжениях имеет вид

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_p - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_p)^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma_p, \sigma_\varphi, \sigma_z$  – радиальные, тангенциальные и осевые напряжения.

Используя гипотезы деформационной теории пластичности, запишем уравнения, связывающие главные деформации с главными напряжениями в цилиндрической системе координат:

$$\left. \begin{aligned} e_p &= \frac{e_i}{\sigma_i} \left[ \sigma_p - \frac{1}{2} (\sigma_\varphi + \sigma_z) \right]; \\ e_\varphi &= \frac{e_i}{\sigma_i} \left[ \sigma_\varphi - \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_p) \right]; \\ e_z &= \frac{e_i}{\sigma_i} \left[ \sigma_z - \frac{1}{2} (\sigma_p + \sigma_\varphi) \right]. \end{aligned} \right\}$$

Из третьего уравнения, с учетом, как было сказано выше, что  $e_z = 0$ , имеем

$$\sigma_z = \frac{1}{2} (\sigma_p + \sigma_\varphi).$$

Подставляя это соотношение в (5), получаем

$$\sigma_i = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\varphi + \sigma_p). \quad (6)$$

## 2. Определение напряженного состояния

Преобразуя дифференциальное уравнение равновесия (4) с использованием соотношения (6), получим

$$\frac{d\sigma_p}{d\rho} = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_i}{\rho}, \quad (7)$$

где знак плюс соответствует растянутой в тангенциальном направлении области, а знак минус – сжатой.

Чтобы решить данное уравнение, необходимо знать функцию изменения интенсивности напряжений по радиусу  $\sigma_i = \sigma_i(\rho)$ .

Для определения функции изменения интенсивности напряжений по радиусу при изгибе необходимо иметь диаграмму деформирования материала как функцию изменения интенсивности истинных напряжений от интенсивности истинных (логарифмических) деформаций.

Для аналитического описания диаграммы деформирования с учетом сжимаемости, воспользуемся линейно-степенной аппроксимацией в виде [18] (рис. 3):

$$\sigma_i = \begin{cases} 3Ge_i, & \text{при } e_i \leq e_{iT}; \\ Ke_i^n, & \text{при } e_i > e_{iT}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $G = E/[2(1 + \mu)]$  – модуль упругости второго рода;  $e_{iT}$  – значение интенсивности деформаций, соответствующее точке перехода линейной зависимости в степенную (предел текучести аппроксимации);  $K$  и  $n$  – параметры степенной функции, которые выражаются через основные механические характеристики материала.

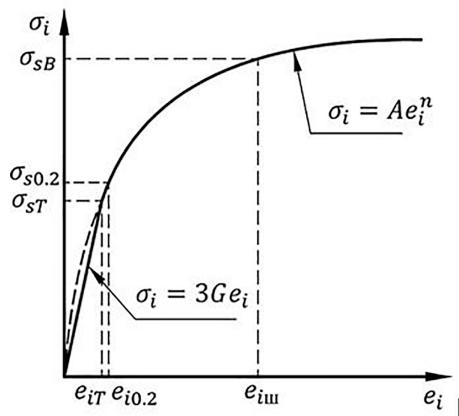


Рис. 3. Схема аппроксимации диаграммы деформирования линейно-степенной функцией

Подставляя в уравнение (8) выражение (3), получаем:

а) растянутая область ( $r_{q0} \leq \rho \leq R$ ):

$$\sigma_i = \begin{cases} 2\sqrt{3} \ln \frac{\rho}{r_{q0}}, & \text{при } r_{q0} \leq \rho \leq \rho_{\text{пл}}; \\ K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r_{q0}} \right)^n, & \text{при } \rho_{\text{пл}} < \rho \leq R, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\rho_{\text{пл}}$  – радиус границы между упругой и пластической зонами в растянутой области:

$$\rho_{\text{пл}} = r_{q0} \exp \left( \frac{\sqrt{3}}{2} e_{iT} \right);$$

б) сжатая область ( $r \leq \rho \leq r_{q0}$ ):

$$\sigma_i = \begin{cases} 2\sqrt{3} \ln \frac{r_{q0}}{\rho}, & \text{при } \rho' \leq \rho \leq r_{q0}; \\ K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r_{q0}} \right)^n, & \text{при } r < \rho \leq \rho'_{\text{пл}}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\rho'_{\text{пл}}$  – радиус границы между упругой и пластической зонами в сжатой области:

$$\rho'_{\text{пл}} = r_{q0} / \exp \left( \frac{\sqrt{3}}{2} e_{iT} \right).$$

Подставляя уравнения (9) в дифференциальное уравнение (7) и решая с учетом граничных условий (при  $\rho = R \sigma_\rho = -q_R$ ; при  $\rho = \rho_{\text{пл}} \sigma_\rho = \sigma'_{\rho \text{пл}}$ ), определим радиальные и тангенциальные напряжения в растянутой области:

$$\sigma_\rho = \begin{cases} 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho}{r_{q0}} \right)^2 - \frac{3}{4} (e_{iT})^2 \right] + \sigma_{\rho \text{пл}}, & r_{q0} \leq \rho \leq \rho_{\text{пл}}; \\ \frac{K}{n+1} \left[ \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r_{q0}} \right)^{n+1} - \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r_{q0}} \right)^{n+1} \right], & \rho_{\text{пл}} < \rho \leq R, \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_\varphi = \begin{cases} \sigma_\rho + 4G \ln \frac{\rho}{r_{q0}}, & r_{q0} \leq \rho \leq \rho_{\text{пл}}; \\ \sigma_\rho + \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r_{q0}} \right)^n, & \rho_{\text{пл}} < \rho \leq R. \end{cases} \quad (12)$$

Решая уравнение равновесия (7) с учетом граничных условий для сжатой области (при  $\rho = r \sigma'_\rho = -q_r$ ; при  $\rho = \rho'_{\text{пл}} \sigma'_\rho = \sigma'_{\rho \text{пл}}$ ), получаем

$$\sigma'_\rho = \begin{cases} 2G \left[ \left( \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right)^2 - \frac{3}{4} (err)^2 \right] + \sigma'_{\rho \text{пл}}, & \rho_{\text{пл}} \leq \rho < r_{q0}; \\ \frac{K}{n+1} \left[ \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right)^{n+1} - \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{r} \right)^{n+1} \right] - q_r, & r \leq \rho < \rho'_{\text{пл}}; \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma'_\varphi = \begin{cases} \sigma'_\rho - 4G \ln \frac{r_{q0}}{\rho}, & \rho_{\text{пл}} \leq \rho < r_{q0}; \\ \sigma'_\rho - \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right)^n, & r \leq \rho < \rho'_{\text{пл}}. \end{cases} \quad (14)$$

Значения  $\sigma_{\rho \text{пл}}$  и  $\sigma'_{\rho \text{пл}}$  определяются исходя из условий: при  $\rho = \rho_{\text{пл}} \sigma_\rho = \sigma_{\rho \text{пл}}$  для пластической области в растянутой зоне;  $\rho = \rho'_{\text{пл}} \sigma'_\rho = \sigma'_{\rho \text{пл}}$  для пластической области в сжатой зоне:

$$\sigma_{\rho \text{пл}} = \frac{K}{n+1} \left[ (e_{iT})^{n+1} - \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r_{q0}} \right)^{n+1} \right] - q_R;$$

$$\sigma'_{\rho \text{пл}} = \frac{K}{n+1} \left[ (e_{iT})^{n+1} - \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{r} \right)^{n+1} \right] - q_r.$$

Положение радиуса нейтрального слоя при изгибе с радиальным сжатием можно найти из условия равенства радиальных напряжений на нейтральном слое в сжатой и растянутой области. Приравнивая эти напряжения, получим уравнение, решая которое численно можно определить радиус нейтрального слоя  $r_{q0}$  при изгибе с радиальным сжатием:

$$\left( \ln \frac{R}{r_{q0}} \right)^{n+1} - \left( \frac{r_{q0}}{r} \right)^{n+1} - \frac{q(r-R)(n+1)}{K} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{n+1} = 0. \quad (15)$$

Анализируя выражение (15), можно сделать вывод, что при радиальном сжатии, равном нулю,  $r_{q0} = \sqrt{Rr}$ , и это хорошо согласуется с известными решениями.

Изгибающий момент в продольном сечении на единицу ширины листа относительно центра кривизны определяется выражением

$$\bar{M}_{q\varphi} = \int_r^R \sigma_\varphi(\rho) \rho d\rho,$$

которое при использовании уравнений (11)–(14) примет вид

$$\begin{aligned} \bar{M}_{q\varphi} = & \int_r^{r'_{\text{пл}}} \left[ \sigma'_\rho - \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right)^n \right] \rho d\rho + \\ & + \int_{r'_{\text{пл}}}^{r_0} \left[ \sigma'_\rho - 4G \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right] \rho d\rho + \int_{r_0}^{r'_{\text{пл}}} \left[ \sigma'_\rho - 4G \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right] \rho d\rho + (16) \\ & + \int_{r'_{\text{пл}}}^R \left[ \sigma'_\rho + \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right)^n \right] \rho d\rho. \end{aligned}$$

При заданной геометрии изгиба изгибающий момент определяется по выражению (16) численно.

Проверкой правильности определения напряженного состояния является равенство нулю растягивающей силы на единицу ширины листа в тангенциальном направлении:

$$\bar{P}_{q\varphi} \int_r^R \sigma_\varphi(\rho) d\rho = 0.$$

При использовании уравнений (11)–(14)

$$\begin{aligned} \bar{P}_{q\varphi} = & \int_r^{r'_{\text{пл}}} \left[ \sigma'_\rho - \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_0}{\rho} \right)^n \right] d\rho + \\ & + \int_{r'_{\text{пл}}}^{r_0} \left[ \sigma'_\rho - 4G \ln \frac{r_0}{\rho} \right] d\rho + \int_{r_0}^{r'_{\text{пл}}} \left[ \sigma'_\rho + 4G \ln \frac{\rho}{r_0} \right] d\rho + (17) \\ & + \int_r^{r'_{\text{пл}}} \left[ \sigma'_\rho + \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{r_0} \right)^n \right] d\rho = 0. \end{aligned}$$

На рис. 4 и 5 представлены эпюры тангенциальных и радиальных напряжений при различных значениях радиального сжатия при изгибе заготовки из материала АМг3-М: внутренний радиус изгиба  $r = 30$  мм, толщина заготовки 1 мм.

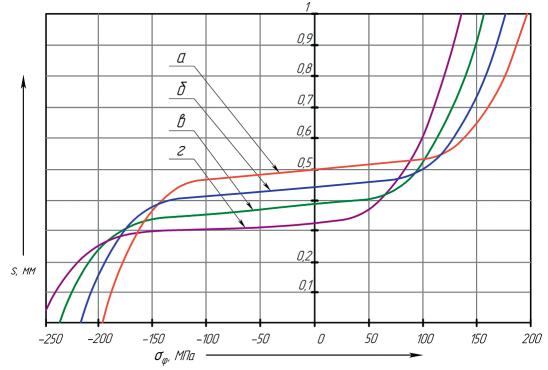


Рис. 4. Эпюры тангенциальных напряжений при различных значениях радиального сжатия:  $a - q_R = 0$  МПа;  $\beta - q_R = 25$  МПа;  $\gamma - q_R = 50$  МПа;  $\delta - q_R = 75$  МПа

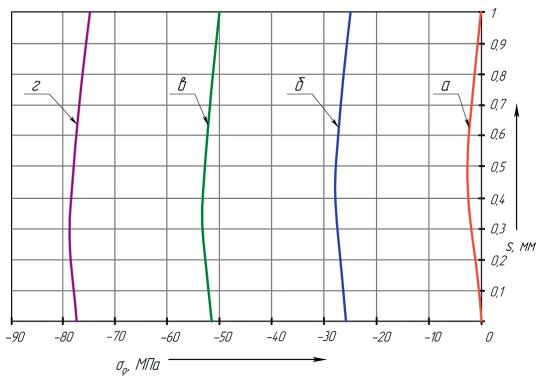


Рис. 5. Эпюры радиальных напряжений при различных значениях радиального сжатия:  $a - q_R = 0$  МПа;  $\beta - q_R = 25$  МПа;  $\gamma - q_R = 50$  МПа;  $\delta - q_R = 75$  МПа

Как показали расчеты, условие (17) для напряжений, представленных на рис. 4, выполняется при всех значениях радиального сжатия.

Из рис. 4 и 5 следует, что при увеличении радиального сжатия эпюра тангенциальных напряжений смещается вниз и влево, а эпюра радиальных напряжений смещается также вниз и влево на значение увеличения усилия радиального сжатия. При этом радиус нейтрального слоя уменьшается, а сам нейтральный слой смещается по толщине заготовки вниз.

На рис. 6 представлены графики относительного смещения нейтрального слоя по толщине, определенного по выражению (15) при изгибе с радиальным сжатием, по отношению к срединному слою  $h_{cp} = (R + r)/2$ , в зависимости от значения радиального сжатия при различных внутренних радиусах изгиба:

$$\Delta h_{q0} \% = \frac{h_{q0p} - h}{h_{cp}} \cdot 100.$$

Как видно из рис. 6, при увеличении радиального сжатия смещение вниз нейтрального слоя увеличивается и изменяется пропорционально,

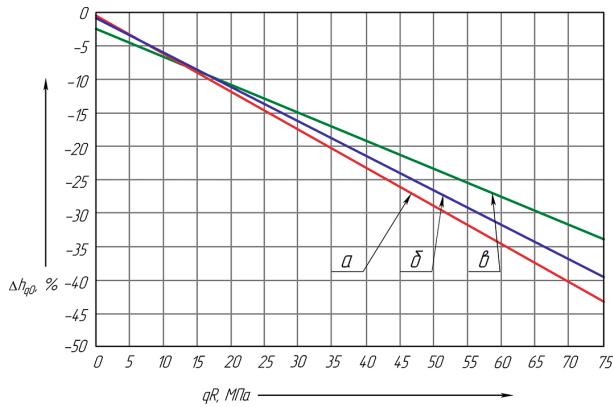


Рис. 6. Относительное смещение нейтрального слоя в зависимости от значения радиального сжатия при различных внутренних радиусах изгиба:  
а —  $r = 50$  мм; б —  $r = 30$  мм; в —  $r = 10$  мм

причем относительное смещение вниз тем больше, чем больше радиус изгиба, и может достигать значительных величин.

Рассмотрим изменение изгибающего момента в зависимости от радиального сжатия.

На рис. 7 представлены графики относительного изменения изгибающего момента в процентах по отношению к изгибающему моменту при изгибе без радиального сжатия, в зависимости от радиального сжатия при различных внутренних радиусах изгиба:

$$\Delta \bar{M}_{q\varphi} \% = \frac{\bar{M}_{q\varphi} - \bar{M}_\varphi}{\bar{M}_\varphi} \cdot 100.$$

Как видно из рис. 7, при увеличении радиального сжатия изгибающий момент уменьшается, причем уменьшение в процентном отношении тем больше, чем больше радиус изгиба.

Можно отметить, что при небольших значениях радиального сжатия изгибающий момент меняется

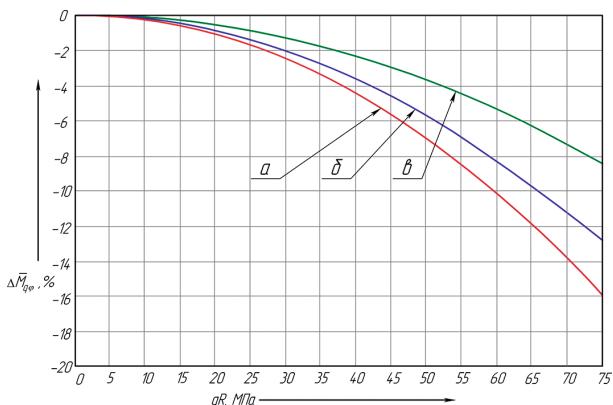


Рис. 7. Относительное изменение изгибающего момента в зависимости от значения радиального сжатия при различных внутренних радиусах изгиба:  
а —  $r = 50$  мм; б —  $r = 30$  мм; в —  $r = 10$  мм

незначительно, а при усилиях, приближающихся к  $\sigma_{0,2}$ , уменьшение изгибающего момента может быть весьма существенным. Таким образом, можно сделать вывод: при увеличении радиального сжатия пружинение заготовки уменьшается.

### 3. Остаточная кривизна пластиически изогнутой заготовки с радиальным сжатием после снятия нагрузки

В соответствии с теоремой Ильюшина о разгрузке, остающиеся в теле деформации равны разности их значений в истинном и фиктивном состоянии равновесия. Истинное состояние равновесия соответствует упруго-пластическому изгибу, при котором момент внутренних сил определяется выражением (16). Фиктивное состояние равновесия соответствует задаче упругости для рассматриваемой схемы нагружения при равном моменте внутренних сил.

Рис. 8 иллюстрирует действие упругих деформаций на изогнутую деталь в процессе разгрузки.

Сечения  $AA'$  и  $BB'$  разворачиваются под действием упругих деформаций в положение  $A'A'$  и  $B'B'$  вследствие того, что в растянутой зоне длина волокон уменьшается, а в сжатой — увеличивается. Радиус нейтрального слоя, относительно которого поворачиваются сечения при упругой разгрузке, обозначим  $\rho_0$ . В процессе разгрузки изменение длины волокон приводит к изменению радиуса нейтрального слоя  $\rho_{0\text{ост}}$  и угла изгиба рассматриваемого элемента  $\theta_0$ . Остаточный радиус нейтрального слоя  $\rho_{0\text{ост}} > \rho_0$ , а остаточный угол изгиба  $\theta_{0\text{ост}} < \theta_0$ .

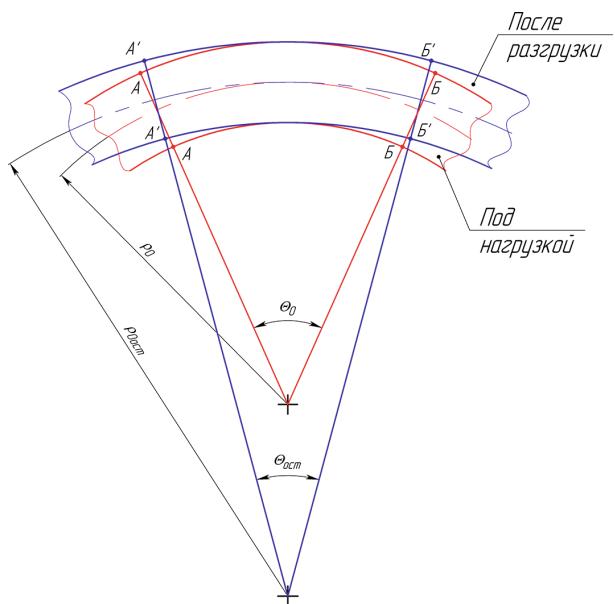


Рис. 8. Действие упругих деформаций на изогнутую деталь в процессе разгрузки

Из рис. 8 следует, что изменение угла изгиба рассматриваемого элемента в процессе разгрузки можно определить как разность угла изгиба под действием внешней нагрузки и остаточного угла изгиба:

$$\theta_{\text{разг}} = \theta_0 - \theta_{\text{ост}}. \quad (18)$$

Выражая углы изгиба в выражении (18) через соответствующие радиусы и длину нейтрального слоя, а также учитывая, что длина нейтрального слоя не меняется в процессе разгрузки, после несложных преобразований получаем уравнение, в соответствии с которым конечная кривизна некоторого слоя заготовки после разгрузки определяется как разность между кривизной этого слоя под нагрузкой и изменением его кривизны при разгрузке:

$$\frac{1}{\rho_{\text{ост}}} = \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{\text{разг}}}, \quad (19)$$

где  $\rho_{\text{разг}}$  – фиктивный радиус кривизны нейтрального слоя абсолютно упругой заготовки при воздействии изгибающего момента и радиальным сжатия, равных изгибающему моменту и радиальному сжатию при нагружении;  $\rho_0$  – радиус слоя заготовки, соответствующий  $\rho_{\text{разг}}$ , под нагрузкой;  $\rho_{\text{ост}}$  – остаточный радиус слоя заготовки, соответствующий  $\rho_{\text{разг}}$ , после разгрузки.

Таким образом, для определения остаточного радиуса кривизны при изгибе с радиальным сжатием необходимо найти, по аналогии с известным решением изгиба без радиального сжатия, связь между изгибающим моментом и фиктивным радиусом изгиба упругой заготовки.

Из уравнения (9) для упругого деформирования получим:

$$\sigma_i = \pm 2\sqrt{3}G \ln \frac{\rho}{\rho_{q0}},$$

где  $\rho_{q0}$  – радиус нейтрального слоя при упругом изгибе с радиальным сжатием.

Используя уравнение (7) и интегрируя, определяем напряженное состояние при упругом изгибе с радиальным сжатием:

$$\sigma_\rho = \begin{cases} 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho}{\rho_{q0}} \right)^2 - \left( \ln \frac{R}{\rho_{q0}} \right)^2 \right] - q_R, & \rho_{q0} \leq \rho \leq R; \\ 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho_{q0}}{\rho} \right)^2 - \left( \ln \frac{\rho_{q0}}{r} \right)^2 \right] - q_r, & r \leq \rho < \rho_{q0}; \end{cases} \quad (20)$$

$$\sigma_\varphi = \begin{cases} 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho}{\rho_{q0}} \right)^2 - \left( \ln \frac{R}{\rho_{q0}} \right)^2 \right] - q_R + 4G \ln \frac{\rho}{\rho_{q0}}, & \rho_{q0} \leq \rho \leq R; \\ 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho_{q0}}{\rho} \right)^2 - \left( \ln \frac{\rho_{q0}}{r} \right)^2 \right] - q_r - \ln \frac{\rho_{q0}}{\rho}, & r \leq \rho < \rho_{q0}. \end{cases} \quad (21)$$

Положение радиуса нейтрального слоя при упругой разгрузке  $\rho_{\text{разг}}$  соответствует радиусу нейтрального слоя при упругом изгибе с радиальным сжатием  $\rho_{q0}$ , который можно найти из условия равенства радиальных напряжений на нейтральном слое в сжатой и растянутой области. Приравнивая эти напряжения, получаем уравнение, решая которое численно можно определить радиус нейтрального слоя при упругой разгрузке:

$$\left( \ln \frac{R}{\rho_{\text{разг}}} \right)^2 - \left( \ln \frac{\rho_{\text{разг}}}{r} \right)^2 - \frac{q(r-R)}{2G} = 0. \quad (22)$$

Анализируя данное уравнение, можно сделать вывод, что при равенстве радиальной нагрузки нулю радиус нейтрального слоя при разгрузке определяется как

$$\rho_{\text{разг}} = \rho_0 = \sqrt{Rr}, \quad (23)$$

что совпадает с известными решениями для изгиба без радиального сжатия.

На рис. 9 представлены графики относительного изменения радиуса нейтрального слоя, определенного по выражению (22) при упругой разгрузке с радиальным сжатием, по отношению к радиусу нейтрального слоя, определенного по выражению (23) при изгибе без радиального сжатия:

$$\Delta\rho_{\text{разг}} \% = \frac{\rho_{\text{разг}} - \rho_0}{\rho_0} \cdot 100.$$

Как видно из рис. 9, при различных радиусах изгиба, независимо от значения радиального сжатия, погрешность определения радиуса нейтрального слоя при упругой разгрузке по формуле (23) не превышает 0,1% от значений, определяемых по выражению (22). Таким образом, с большой точностью можно принять, что независимо от радиального

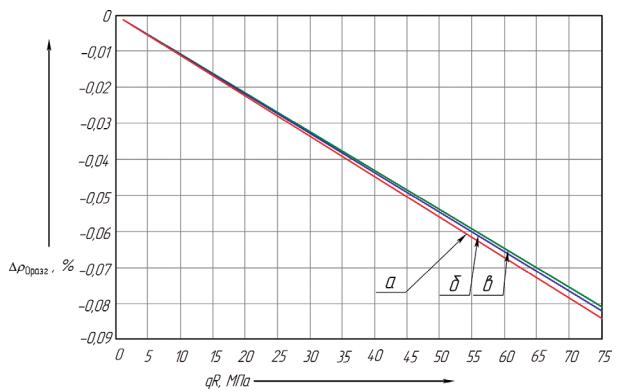


Рис. 9. Относительное изменение радиуса нейтрального слоя при упругой разгрузке с радиальным сжатием в зависимости от радиального сжатия при различных внутренних радиусах изгиба:  
a –  $r = 10$  мм; б –  $r = 30$  мм; в –  $r = 50$  мм

сжатия радиус нейтрального слоя при разгрузке определяется выражением

$$\rho_{\text{разг}} = \sqrt{R_{\text{разг}} r_{\text{разг}}}. \quad (24)$$

Будем считать, что толщина заготовки при изгибе не меняется [16]. В этом случае  $R_{\text{разг}} = r_{\text{разг}} + s$ . Тогда, решая уравнение (24) относительно  $r_{\text{разг}}$ , получаем:

$$r_{\text{разг}} = \sqrt{\rho_{0\text{разг}}^2 + \frac{s^2}{4}} - \frac{s}{2}. \quad (25)$$

Теперь, зная радиус нейтрального слоя и радиус внутренней поверхности заготовки при упругой разгрузке, можно определить положение нейтрального слоя заготовки по толщине, остаточную кривизну которого нам необходимо определить:

$$h_{0\text{разг}} = \rho_{0\text{разг}} - \left( \sqrt{\rho_{0\text{разг}}^2 + \frac{s^2}{4}} - \frac{s}{2} \right). \quad (26)$$

В этом случае выражение (19) можно записать так:

$$\frac{1}{r_{\text{oct}} + h_{0\text{разг}}} = \frac{1}{r + h_{0\text{разг}}} - \frac{1}{\rho_{0\text{разг}}}, \quad (27)$$

откуда можно выразить остаточный радиус внутренней поверхности заготовки при изгибе с радиальным сжатием:

$$r_{\text{oct}} = \frac{\rho_{0\text{разг}} (r + h_{0\text{разг}})}{\rho_{0\text{разг}} - (r + h_{0\text{разг}})} - h_{0\text{разг}}. \quad (28)$$

Определим изгибающий момент в продольном сечении на единицу ширины листа при упругой разгрузке. Погонный момент внутренних сил будем определять относительно центра кривизны:

$$\bar{M}_{\text{упр}\varphi} = \int_r^R \sigma_\varphi(\rho) \rho d\rho. \quad (29)$$

Используя выражение (21), записываем выражение (29) в виде (\*).

После интегрирования и преобразований получим:

$$\bar{M}_{\text{упр}\varphi} = 2G \left\{ \left[ \frac{R^2}{2} \left( \ln \frac{R}{\rho_{0\text{разг}}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{r^2}{2} \left( \ln \frac{r}{\rho_{0\text{разг}}} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{q_R}{4G} R(R-r) \right\}. \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_{\text{упр}\varphi} &= \int_r^{\rho_{0\text{разг}}} \left\{ 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho_{0\text{разг}}}{\rho} \right)^2 - \left( \ln \frac{\rho_{0\text{разг}}}{r} \right)^2 \right] - qr - 4G \ln \frac{\rho_{0\text{разг}}}{\rho} \right\} \rho d\rho + \\ &+ \int_{\rho_{0\text{разг}}}^R \left\{ 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho}{\rho_{0\text{разг}}} \right)^2 - \left( \ln \frac{R}{\rho_{0\text{разг}}} \right)^2 \right] - qr + 4G \ln \frac{\rho}{\rho_{0\text{разг}}} \right\} \rho d\rho. \end{aligned} \quad (*)$$

Уравнение (30) позволяет решить обратную задачу – определение изгибающего момента при известном радиусе изгиба, но не позволяет решить прямую задачу – определение радиуса изгиба при известном моменте.

При анализе результатов, получаемых с использованием уравнения (30), на основании численных экспериментов была получена полуэмпирическая формула, позволяющая однозначно связать изгибающий момент и фиктивный радиус нейтрального слоя при упругой разгрузке с радиальным сжатием:

$$\bar{M}_{\text{разг}\varphi} = \frac{Gs^3}{3\rho_{0\text{разг}}} \left( 1 + \frac{q_R}{4G} \right), \quad (31)$$

где  $G = E/[2(1 + \mu)]$  – модуль упругости второго рода;  $s$  – толщина заготовки;  $q_R$  – радиальное давление на внешней поверхности заготовки;  $\rho_{0\text{разг}}$  – фиктивный радиус кривизны нейтрального слоя при упругой разгрузке с радиальным сжатием.

На рис. 10 представлены графики, показывающие погрешность определения  $\bar{M}_{\text{разг}\varphi}$  по формуле (31) по сравнению с точным определением  $\bar{M}_{\text{упр}\varphi}$  по формуле (30):

$$\Delta \bar{M}_{\text{разг}\varphi} = \frac{\bar{M}_{\text{разг}\varphi} - \bar{M}_{\text{упр}\varphi}}{\bar{M}_{\text{упр}\varphi}} \cdot 100$$

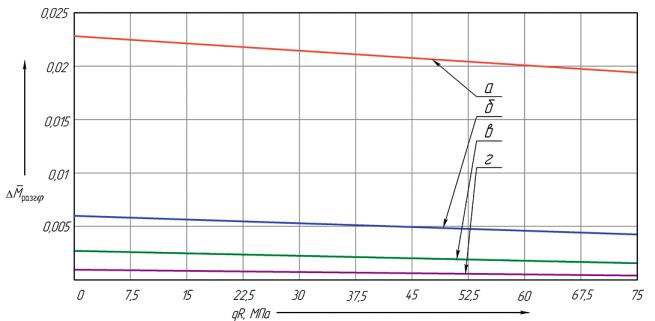


Рис. 10. Погрешность определения изгибающего момента разгрузки  $\bar{M}_{\text{разг}\varphi}$  по формуле (31) по сравнению с точным определением  $\bar{M}_{\text{упр}\varphi}$  по формуле (30) в зависимости от радиального сжатия при различных внутренних радиусах изгиба:  $a - r_{\text{разг}} = 10$  мм;  $b - r_{\text{разг}} = 20$  мм;  $v - r_{\text{разг}} = 30$  мм;  $g - r_{\text{разг}} = 50$  мм

при различных радиусах изгиба и радиальном давлении.

Как видно из рис. 10, погрешность составляет сотые доли процента независимо от усилия радиального сжатия. Причем эта погрешность при увеличении радиуса стремится к нулю.

Так как момент при разгрузке  $\bar{M}_{\text{разг}}$  равен моменту внутренних сил при изгибе с учетом радиального сжатия  $\bar{M}_{q\varphi}$ , значение которого определяют по уравнению (16), то, используя уравнение (31), можно получить уравнение для определения изменения кривизны нейтрального слоя детали в процессе упругой разгрузки:

$$\frac{1}{\rho_0 \text{разг}} = \frac{3\bar{M}_{q\varphi}}{Gs^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right)}. \quad (32)$$

Для моделирования напряженно-деформированного состояния при упруго-пластическом изгибе листовой заготовки и оценки кривизны в процессе ее упругой разгрузки была разработана программа, закрепленная свидетельством о государственной регистрации [19]. Программа предназначена для определения радиуса заготовки и распределения нормальных напряжений при изгибе после снятий деформирующего усилия. Изгиб заготовки осуществляется за счет создания изгибающего момента под действием деформирующего усилия на технологическую оснастку. При этом со стороны оснастки создается дополнительно сжимающая нагрузка. При сжатии заготовки возникают дополнительные нормальные напряжения, которые меняют положение нейтрального слоя нормальных напряжений при изгибе, тем самым меняя общую картину напряженно-деформированного состояния. Распределенная сжимающая нагрузка в этой программе считается постоянной по длине изгиба. Этого можно достичь, используя оснастку с эластосыпучими средами.

#### 4. Опытные результаты изготовления труб гидrogазовых систем летательных аппаратов путем свертывания листовой заготовки

Для получения тонкостенных труб для гидрогазовых систем ЛА из листовых заготовок штамповкой в эластосыпучей среде разработана конструкция штампа, неподвижная часть которого выполнена в виде контейнера, заполненного эластосыпучей средой. Схемы штампа в исходном состоянии и при штамповке приведены на рис. 11, а и б [20]. Материал заготовки — лист алюминиевого сплава АМг2 толщиной 1,5 мм. В качестве эластосыпучего материала использованы шары из поли-

уретана СКУ-7Л (ТУ 22.29.29-001-15762649-2017) диаметром 5 мм.

Внешний вид экспериментального штампа и опытного образца произведенной детали представлен на рис. 12, а и б. Установлено, что по сравнению со штамповкой в цельную эластичную матрицу новый способ свертывания изделия с применением разработанного штампа имеет следующие преимущества:

- уменьшение усилия деформирования (при мерно в 4 раза, что позволяет уменьшить время изготовления и использовать для производства изделия оснастку из более дешевого материала, например из пластика, напечатанную на 3D-принтере, что упрощает задачу механической обработки);
- улучшение качества выполнения детали (точность изготовления увеличивается на 3 ... 12%);

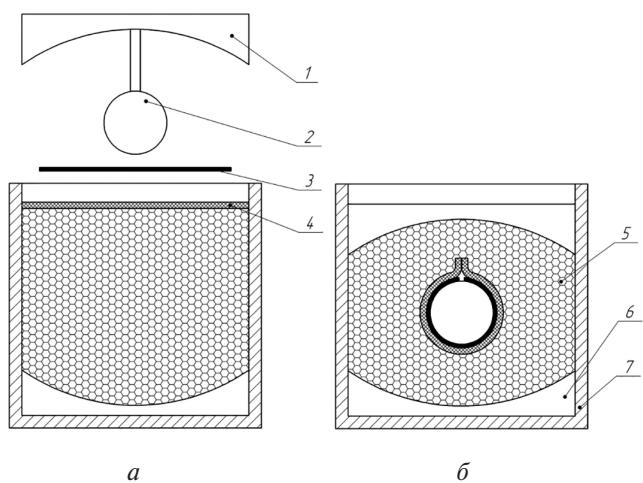


Рис. 11. Схемы штампа в исходном состоянии (а) и при штамповке (б): 1 — пuhanсонодержатель; 2 — пuhanсон; 3 — листовая заготовка; 4 — резиновая пластина; 5 — эластосыпучая среда; 6 — вкладыш; 7 — контейнер

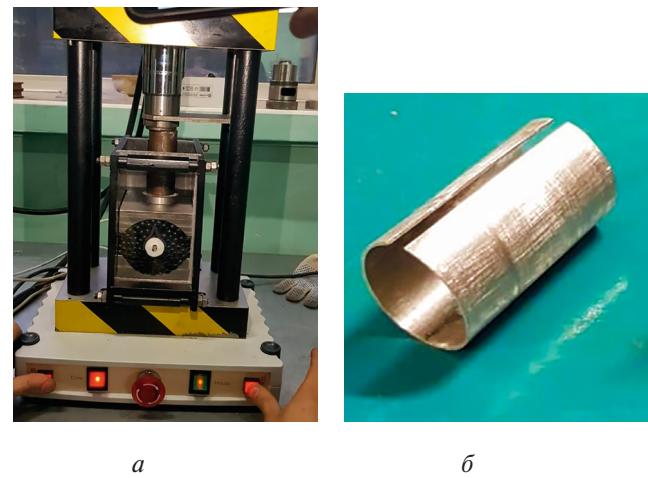


Рис. 12. Внешний вид экспериментального штампа (а); опытный образец (б)

- значительное увеличение глубины внедрения пуансона;
- отсутствие необходимости изготовления дополнительных матричных блоков для получения деталей из листовых заготовок различной конфигурации, что указывает на универсальность разработанного штампа;
- возможность изготовления более тонкостенных труб для гидrogазовых деталей самолетов, так как можно использовать тонколистовые заготовки толщиной 0,3 ... 1,0 мм;
- повышение эксплуатационных характеристик оснастки (увеличение числа циклов эксплуатации).

В результате штамповки эластосыпучей средой свертыванием по диаметру была получена деталь без трещин и заломов и с постоянной толщиной по всему периметру. На основе разработанной программы была определена геометрия пуансона и заготовки с учетом пружинения, в результате чего была достигнута требуемая геометрия конечной детали.

## Выводы

1. Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния при упруго-пластическом изгибе листовой заготовки и оценка кривизны в процессе ее упругой разгрузки для разработки технологии изготовления деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов.

2. На основании численного эксперимента получено полуэмпирическое уравнение, позволяющее однозначно связать изгибающий момент, действующий при изгибе с радиальным сжатием, и изменение кривизны нейтрального слоя при упругой разгрузке, что дало возможность определить остаточную кривизну заготовки.

3. Разработана программа для определения радиуса заготовки и распределения нормальных напряжений при изгибе после снятий деформирующего усилия.

4. На основе проведенных исследований была разработана технологическая оснастка для получения труб из листовых заготовок штамповкой в эластосыпучей среде, позволяющая снизить себестоимость деталей при обеспечении значительных степеней формоизменения, минимального пружинения, стабильности механических свойств изделия и высокого качества поверхностей.

5. Для верификации результатов моделирования изготовлен опытный штамп, проведен натурный эксперимент по свертыванию трубы. Численные и натурные эксперименты показали сходимость полученных результатов.

## Список источников

1. Евдокимов Д.В., Алексенцев А.А., Ахтамьянов Р.М. Разработка комплексной методики оценки отклонений формы изделия и его ресурса в зависимости от технологических остаточных напряжений // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 164–173. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180659> EDN OIOBIO
2. Железнов Л.П. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости некруговой композитной цилиндрической оболочки при внешнем давлении // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 75–84. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180650> EDN DSUPTW
3. Ахмед Солиман М.Э., Курлаев Н.В., Шайдуров С.В. Совершенствование технологии электромагнитного обжима патрубка с жалюзи системы воздухообмена летательных аппаратов путем численного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 96–105. EDN HVUIVC
4. Подрез Н.В., Говорков А.С. Разработка методики оценки технологичности конструкции изделия на основе 3D-модели изделия машиностроения // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 198–207. DOI: 10.34759/vst-2023-1-198-207
5. Амосов А.П., Воронин С.В., Лобода П.С. и др. Определение влияния поверхностного натяжения на механические свойства алюминиевого сплава методом компьютерного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 214–222. DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222
6. Потянихин Д.А., Синельщиков А.А., Мин К.Х. Моделирование напряженно-деформированного состояния трубчатой заготовки при раздаче средней части по жесткой матрице // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-2(52). С. 105–110. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.059 EDN PIOSJL
7. Чернявский Д.И., Чернявский Д.Д. Исследование упругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании // Омский научный вестник. 2023. № 2(186). С. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54. EDN WSRGEE
8. Чернявский Д.И., Чернявский Д.Д. Исследование упругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее гибке с учетом эффекта пружинения // Омский научный вестник. 2024. № 2(190). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14 EDN VQZR
9. Хамин О.Н. Приближенная оценка силовых параметров при штамповке выдавлением полых заготовок // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 5(32). С. 128–134. DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/SMTT/32.5.021
10. Кузнецов А.К., Лозовский И.В., Марьин С.Б. Применение эластосыпучих сред при изготовлении профилей из листовых заготовок // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Сборник трудов II Междуна-

- родной научно-практической конференции молодых ученых (14–18 ноября 2022; Комсомольск-на-Амуре). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2022. Т. 2. С. 277–279.
11. Лозовский И.В., Седунов Я.А. Моделирование процесса формообразования полупатрубка гидрогазовой системы летательного аппарата. // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых (14–18 ноября 2022; Комсомольск-на-Амуре). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2022. Т. 2. С. 288–291.
  12. Feoktistov S.I., Soe K.Z. Identification for technological capabilities of titanium and aluminum alloys in deep drawing process // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299, pp. 628–633. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.628
  13. Andrianov I.K., Stankevich A.V. Finite-element model of the shell-shaped half-pipes forming for blanks behavior investigating during corrugating at the stamping // International Science and Technology Conference "EastConf" (01-02 March 2019; Vladivostok, Russia). DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725322 (In Russ.).
  14. Кузнецов А.К., Лозовский И.В., Марьин С.Б. Совершенствование технологического процесса гибки листовых заготовок с применением эластичных сред // Исследования и перспективные разработки в машиностроении: Сборник трудов VII Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (22–23 сентября 2022; Комсомольск-на-Амуре). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2022. С. 232–236.
  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. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
  17. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
  18. Андрианов И.К., Феоктистов С.И., Марьин С.Б. Основы построения диаграмм деформирования с учетом сжимаемости материала и эффекта Баушингера. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2022. 103 с. DOI: 10.17084/978-5-7765-1479-1-2022 EDN UBDEZA
  19. Лозовский И.В., Феоктистов С.И., Марьин С.Б. Программа для определения остаточного радиуса и остаточных напряжений в заготовке при изгибе с учетом радиального сжатия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2025662681. Бюл. № 6, 22.05.2025.
  20. Лозовский И.В., Марьин С.Б., Черномас В.В. и др. Изготовление трубы свертыванием листовой заготовки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 12(765). С. 124–130. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-12-124-130. EDN XAPDHX

## References

1. Evdokimov DV, Aleksentsev AA, Akhtam'yanov RM. Developing Complex Evaluation Technique for the Product Shape Deviations and Its Endurance in Dependence of Technological Residual Stresses. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):164–173. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180659> EDN OIOBIO
2. Zheleznov LP. The Nonlinear Deformation and Stability Study of the Non-circular Composite Cylindrical Shell at the External Pressure. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):75–84. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180650> EDN DSUPTW
3. Ahmed Soliman ME, Kurlaev NV, Shaidurov SV. Improving the Technology of Electromagnetic Compression of Branch Tube with Blinds of the Air Exchange System of Aircraft by Numerical Simulation. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):96–105. (In Russ.). EDN HVUIVC
4. Podrez NV, Govorkov AS. Developing manufacturability assessing technique of the product structure based on the 3D model of a mechanical engineering product. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(1):198–207. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-1-198-207 EDN DDUUKP
5. Amosov AP, Voronin SV, Loboda PS, et al. Determining surface tension effect on aluminum alloy mechanical properties by computer simulation technique. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(2):214–222. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222
6. Potianikhin DA, Sinelshchikov AA, Min KH. Simulation of the stress-strain state of a tubular billet during the expansion of its middle part using rigid die. *Marine Intellectual Technologies*. 2021(2-2): 05–110. (In Russ.). DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.059 EDN PIOSJL
7. Chernyavsky DI, Chernyavsky DD. Study elastoplastic bending of a sheet blank of different thickness while rolling. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023(2):44–54. (In Russ.). DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54
8. Chernyavsky DI, Chernyavsky DD. Study of elastoplastic bending of sheet blank of different thickness at its bending taking into account the springing effect. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024(2):5–14. (In Russ.). DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14 EDN VQZRGJ
9. Hamin ON. Approximate estimation of force parameters during stamping by extrusion of hollow blanks. *Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2020;5(32):128–134. (In Russ.). DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/SMTT/32.5.021
10. Kuznetsov AK, Lozovskiy IV, Marin SB. Application elasto-flowing media in the manufacture of profiles from sheet blanks. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh "Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idei k vnedreniyu" (November 14–18, 2022; Komsomolsk-on-Amur)*. Komsomolsk-on-Amur: KnAGU; 2022. Vol. 2. p. 277–279. (In Russ.).

11. Lozovskiy IV, Sedunov YaA. Modeling of the process of forming a half-pipe of a hy-dro-gas system of an aircraft. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh "Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idei k vnedreniyu"* (November 14-18, 2022; Komsomolsk-on-Amur). Komsomolsk-on-Amur: KnAGU; 2022. Vol. 2. p. 288–291. (In Russ.).
12. Feoktistov SI, Soe KZ. Identification for technological capabilities of titanium and aluminum alloys in deep drawing process. *Solid State Phenomena*. 2020;299:628–633. (In Russ.). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.628
13. Andrianov IK, Stankevich AV. Finite-element model of the shell-shaped half-pipes forming for blanks behavior investigating during corrugating at the stamping. *International Science and Technology Conference "EastConf" (March 01-02, 2019; Vladivostok, Russia)*. (In Russ.). DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725322
14. Kuznetsov AK, Lozovskiy IV, Marin SB. Improving the technological process of bending sheet blanks using elastic media. *Materialy VII Nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov "Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v mashinostroenii"* (September 22-23, 2022; Komsomolsk-on-Amur). Komsomolsk-on-Amur: KnAGU; 2022. p. 232–236. (In Russ.).
15. Gorbunov MN. *Technology of procurement and stamping operations in the production of aircraft*. Moscow: Mashinostroenie; 1981. 224 p. (In Russ.).
16. Storozhev MV, Popov EA. *Theory of metal processing by pressure*. 4th ed. Moscow: Mashinostroenie; 1977. 423 p. (In Russ.).
17. Malinin NN. *Applied theory of plasticity and creep*. Moscow: Mashinostroenie; 1975. 400 p. (In Russ.).
18. Andrianov IK, Feoktistov SI. *Fundamentals of constructing deformation diagrams taking into account the compressibility of a material and the Bauschinger effect*. Komsomolsk-on-Amur: KnAGU; 2022. 103 p. (In Russ.). DOI: 10.17084/978-5-7765-1479-1-2022 EDN UBDEZA
19. Lozovskiy IV, Feoktistov SI, Maryin SB. *Certificate of State registration of computer programs "Program for determining the residual radius and residual stresses in the workpiece during bending, taking into account radial compression"* RU2025662681, 22.05.2025
20. Lozovskiy IV, Maryin SB, Chernomas VV, et al. Pipe manufacture by sheet blank rolling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2023;12:124–130. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-12-124-130 EDN XAPDHX

Статья поступила в редакцию / Received 23.09.2025  
Одобрена после рецензирования / Revised 11.11.2025  
Принята к публикации / Accepted 21.11.2025