

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.983.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-98-105

## ПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ КРУГЛОЙ В ПЛАНЕ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ

Файфер И. Н.<sup>1,3</sup>, Логинов Ю. Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина», Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Целью работы является установление особенностей формоизменения плоской заготовки на переходе листовой штамповки высокопрочной стали при получении детали переменной кривизны. В ходе выполнения работы были рассчитаны компоненты тензора напряжений, рассмотрены места возможного утонения и особенности распределения степени деформации. Предварительно проводились испытания на растяжение для определения механических свойств. На заготовке были назначены референтные точки, в которых оценивалась толщина стенки детали после перехода штамповки. Напряжённно-деформированное состояние в каждой точке определялось через показатель напряжённого состояния и коэффициент Лоде. При проведении компьютерного моделирования установлена область, расположенная в зоне перегиба заготовки (точка 2), в которой происходит максимальное утонение. Степень деформации  $\epsilon_p$  здесь равна 0,125, среднее нормальное напряжение  $\sigma$  равно +213 МПа. Максимумы значений локализованы близко к точке перегиба, где кривизна меняет знак, эту точку можно считать опасным сечением. При полученном в опытах относительном удлинении  $\delta = 21\%$  расчётная степень деформации  $\epsilon_p$  равна 0,190. Как видно из полученного значения, степень деформации превышает расчётное значение в опасном сечении. Однако такое сравнение не учитывает то, что в опасном сечении может не выполняться линейное напряжённое состояние, характерное для испытания образца на растяжение. В точке 2 максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\phi\phi}$ ,  $\sigma_{zz}$  положительны и равны 254, 273 и 162 МПа, рассчитанный показатель напряжённого состояния  $k$  составляет 1,37, коэффициент Лоде  $\mu_\sigma$  равен 0,62, соответственно, наблюдается трёхосное растяжение, что может привести к снижению пластичности и дальнейшей локализации степени деформации. Локализация степени деформации в одной области может иметь негативные последствия при дальнейшей эксплуатации.

**Ключевые слова:** вытяжка, тензор напряжений, утонение, программный модуль Qform, высокопрочная сталь

© Файфер И.Н., Логинов Ю.Н., 2024

### Для цитирования

Файфер И.Н., Логинов Ю.Н. Пластический изгиб круглой в плане листовой заготовки переменной кривизны // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 98-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-98-105>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# PLASTIC BENDING OF A ROUND SHEET BLANK OF VARIABLE CURVATURE

Faifer I. N.<sup>1,3</sup>, Loginov Yu.N.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> PJSC Machine-Building Plant named after M.I. Kalinin, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** The aim of the work is to establish the features of shaping a flat blank at the transition of high-strength steel sheet stamping when obtaining a part of variable curvature. In the course of the work, the components of the stress tensor were calculated, the places of possible thinning and the features of the distribution of the deformation degree were considered. Tensile tests were previously carried out to determine the mechanical properties. Reference points were assigned on the blank, at which the wall thickness of the part was estimated after the stamping transition. The stress-strain state at each point was determined through the stress state index and the Lode coefficient. During computer modeling, an area located in the bending zone of the blank (point 2) was established, in which maximum thinning occurs. The degree of deformation of  $\varepsilon_p$  here is 0.125, the average normal stress  $\sigma$  is +213 MPa. The maxima of values are localized close to the inflection point, where the curvature changes sign, this point can be considered a dangerous cross section. With the relative elongation  $\delta = 21\%$  obtained in the experiments, the calculated degree of deformation  $\varepsilon_p$  is 0.190. As it can be seen from the obtained value, the degree of deformation exceeds the calculated value in the dangerous section. However, this comparison does not take into account the fact that the linear stress state characteristic of the tensile test of the sample may not be performed in the dangerous section. At point 2, the maximum normal stresses  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\varphi\varphi}$ ,  $\sigma_{zz}$  are positive and equal to 254, 273 and 162 MPa, the calculated stress index  $k$  is 1.37, the Lode coefficient  $\mu_\sigma$  is 0.62, respectively, triaxial stretching is observed, which can lead to a decrease in plasticity and further localization of the deformation degree. Localization of the deformation degree in one area can have negative consequences during further operation.

**Keywords:** extraction, stress tensor, thinning, Qform software module, high-strength steel

## For citation

Faifer I.N., Loginov Yu.N. Plastic Bending of a Round Sheet Blank of Variable Curvature. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 98-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-98-105>

## Введение

Приёмы листовой штамповки часто используются в машиностроении. Предметом исследования являются силовые параметры [1], особенности формоизменения, влияние свойств материала [2], в том числе анизотропии [3], на характер пластического течения. Часть публикаций касается изучения процесса глубокой вытяжки полусферических деталей [4, 5] и близких по форме к ним изделий [6] с использованием в качестве заготовки круглых дисков [7]. При вытяжке отдельные фрагменты листа могут претерпевать утонение, что создает разнотолщинность в готовой детали, и отдельные работы направлены на снижение вредных последствий этого явления [8, 9]. Дополнительно изучались особенности деформации уже изготовленных полусферических оболочек [10]. При недостаточной пластичности деформируемого материала предлагалось процесс листовой штамповки сделать многопереходным, при этом учитывать на заготовке наличие участков переменной кривизны и анизотропию металла [11].

Целью работы является установление особенностей перехода листовой штамповки при получении детали переменной кривизны.

## Производственная ситуация

В публикации [12] был рассмотрен реальный процесс глубокой вытяжки полусферической детали из стали 30X2ГСНВМ (ВЛ-1Д) при различных условиях трения. В том числе было показано, что получить готовое изделие за одну операцию не удаётся из-за слишком малой пластичности металла, поэтому процесс был разбит на четыре перехода с промежуточными отжигами для восстановления пластических свойств. В том числе первый переход предполагал создание круглой в плане детали переменной кривизны. На **рис. 1, а** показана форма поперечного сечения этой детали в системе координат  $r\varphi z$ , а на **рис. 1, б** показана сборка инструмента для листовой штамповки.

Листовая заготовка 1 круглого в плане вида помещена между верхним полуштампом 2 и нижним полуштампом 3, её периферийная часть зажата прижимом 4. Движением по вертикали сверху вниз верхнего полуштампа 2 достигают формоизменения металла.

Заготовка выполнена из высокопрочной стали ВЛ-1Д (32X2ГСНВМ) в соответствии с ТУ 14-1-4461-88 и имеет форму диска диаметром 702 мм, толщиной 2,2 мм, температура процесса равна 20°C. Используется пресс номинальным усилием 50 МН с гидравлическим приводом, скорость перемещения инструмента 10 мм/с.

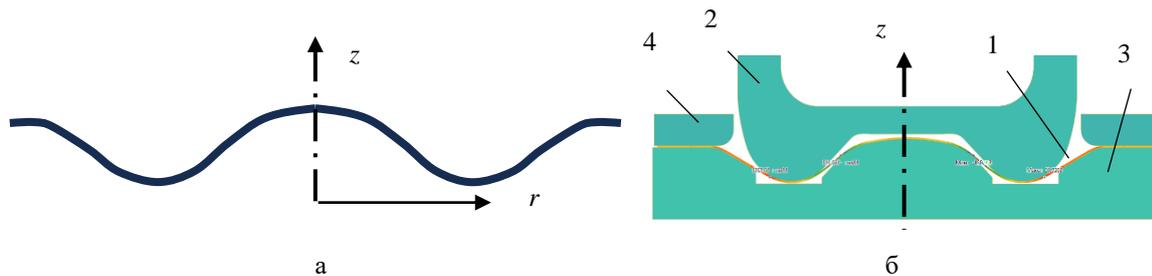


Рис. 1. Форма детали (а) и инструмент для ее штамповки (б) в цилиндрической системе координат  $r\varphi z$ :  
 1 – заготовка; 2 – верхний полуштамп; 3 – нижний полуштамп; 4 – прижим  
 Fig. 1. The shape of the blank (a) and the tool for stamping it (b) in the cylindrical coordinate system  $r\varphi z$ :  
 1 is a blank; 2 is an upper die; 3 is a lower die; 4 is a clamp

Предварительно в эксперименте, аналогичном описанному в [13], были выполнены испытания механических свойств стали ВЛ-1Д (32Х2ГСНМА). В качестве объекта исследования выбраны образцы для контроля механических свойств №7К тип I по ОСТ 1.90011–70. Образцы вырезаны на лазерной установке, замаркированы порядковым номером по возрастанию от 1 до 90. С 1 по 30 номер образцы нарезаны вдоль направления проката, с 31 по 60 – поперёк направления проката, с 61 по 90 — под 45° к направлению проката. В первой части эксперимента были проведены испытания на разрыв 30 образцов в состоянии поставки (по 10 образцов вдоль, поперёк и под 45° к направлению проката). Затем была проведена термообработка (высокий отжиг при  $t^\circ = 720^\circ\text{C}$ , выдержка 2–3 ч, охлаждение на воздухе) и испытаны ещё 30 образцов. Оставшиеся 30 образцов были испытаны через четыре недели после термообработки. По полученным данным испытаний были проведены расчёты и сделаны соответствующие выводы. В качестве факторов выбрано направление проката (под 45°, вдоль или поперёк проката), наличие или отсутствие термообработки, а также время хранения после термообработки.

Выявлено, что непосредственно после термообработки (высокий отжиг при  $t = 720^\circ\text{C}$ , выдержка 2–3 ч, охлаждение на воздухе) временное сопротивление составляет 824 МПа вдоль направления листовой прокатки, а относительное удлинение после разрыва 21%. Следует отметить, что режим термообработки здесь выбран такой, чтобы получить высокие пластические, а не прочностные свойства, это позволяло деформировать металл без разрушения. Однако практика работы показала, что появление трещин на отдельных стадиях обработки всё-таки возможно. В закалённом (от 940°C) и отпущенном (200°C) состоянии сталь обладает высоким временным сопротивлением 1800 МПа и относительным удлинением 7%, то есть пластические свойства заведомо ниже, чем после термообработки в режиме отжига.

По результатам эксперимента, описанного выше, было показано, что наилучшие механические свойства для штамповки показывает сталь сразу после

отжига. Поэтому дальнейшие опыты проводились со сталью в этом состоянии.

### Расчётная часть

Для анализа использовали программный комплекс Qform (КванторФорм, Россия), который успешно применялся ранее для цифровизации процесса листовой штамповки деталей сложной формы [14]. Для оценки ситуации задали коэффициент трения по Кулону 0,2 (из стандартной базы смазочных материалов программного комплекса Qform выбиралась смазка медь+масло). Основанием для выбора данной смазки являются результаты анализа, описанные в [12]. Относительная толщина заготовки (отношение толщины заготовки к начальному диаметру  $\frac{s}{D}$ ) сравнительно мала, так что возможна потеря устойчивости краевой части заготовки и образование здесь волн (гофр). Для предотвращения складкообразования необходимо использовать прижим. Прижим заготовки задавался жёстким неподвижным инструментом на расстоянии 2,2 мм от нижнего полуштампа.

Полученные в ходе испытаний кривые растяжения были перестроены в координатах «Истинное напряжение — Степень деформации». На рис. 2 приведена кривая упрочнения стали 32Х2ГСНМА (ВЛ-1Д) сразу после отжига, пригодная для загрузки в базу данных расчётного модуля.



Рис. 2. Реологическая модель стали 32Х2ГСНМА (ВЛ-1Д) сразу после отжига

Fig. 2. Rheological model of steel 30X2GSNMA (VL-1D) right after heat treatment

В программном комплексе Qform предусмотрен специальный модуль Qshare для генерации конечно-элементной сетки. На заготовке была сгенерирована трёхузловая (треугольная) сетка, общий вид которой по толщине заготовки представлен на **рис. 3**.

Решали плоскую (2D) осесимметричную задачу. Решение представлено в виде инвариантных величин степени деформации  $\epsilon$  (**рис. 4, а**) и среднего нормального напряжения  $\sigma$  (**рис. 4, б**).

Стрелками показаны максимальные значения величин. Они локализованы близко к точке перегиба, где кривизна меняет знак, эту точку можно считать опасным сечением. Эффективная пластическая деформация здесь равна 0,125, среднее нормальное напряжение равно +213 МПа. Эффективная пластическая деформация достаточно небольшая, а среднее нормальное напряжение ниже, чем временное сопротивление. Относительное удлинение до разрыва  $\delta$  можно выразить через эффективную пластическую деформацию  $\epsilon_p$ . Для этого обозначим длину образца до испытания как  $l_0$ , а после разрыва как  $l_1$ . По определению

$$\delta = 100 \cdot (l_1 - l_0)/l_0 = 100 \cdot (l_1/l_0 - 1) = 100 \cdot \exp(\ln(l_1/l_0) - 1) = 100 \cdot \exp(\epsilon_p - 1), \quad (1)$$

или

$$\epsilon_p = \ln(\delta/100 + 1). \quad (2)$$

По формуле (2), при полученном в опытах  $\delta = 21\%$ , получим  $\epsilon_p = 0,190$ . Как видно из полученного значения, эффективная пластическая деформация превышает расчётное значение в опасном сечении. Однако такое сравнение не учитывает то, что в опасном сечении может не выполняться линейное напряжённое состояние, характерное для испытания образца на растяжение. Поэтому важно знать, насколько схема напряжённого состояния в опасном сечении при данном виде штамповки отличается от схемы напряжённого состояния при растяжении образца.

Для оценки ситуации в цилиндрической системе координат  $r\varphi z$  рассчитаны компоненты тензора напряжений  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\varphi\varphi}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{rz}$  они приведены на **рис. 5**.



Рис. 3. Распределение элементов сетки по толщине заготовки  
Fig. 3. Distribution of grid elements according to the thickness of the blank

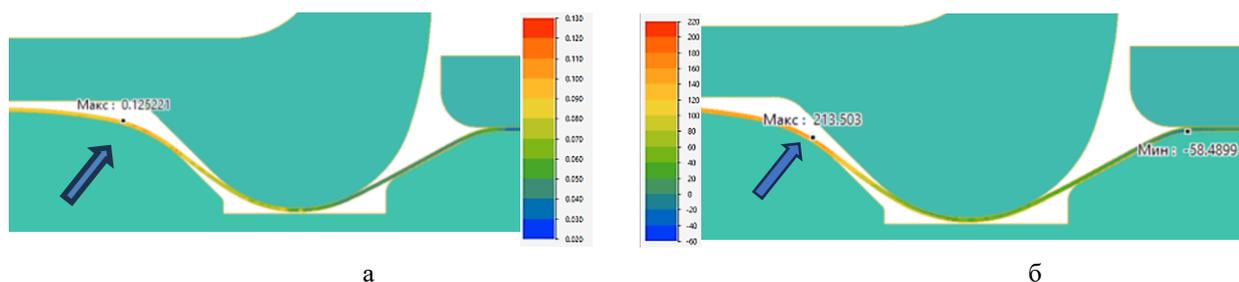


Рис. 4. Распределение эффективной пластической деформации (а) и среднего нормального напряжения (б), правая половина очага деформации (стрелками показаны максимальные значения)  
Fig. 4. The distribution of the effective plastic strain (а) and the average normal stress (б), the right half of the deformation site (the arrows show the maximum values)

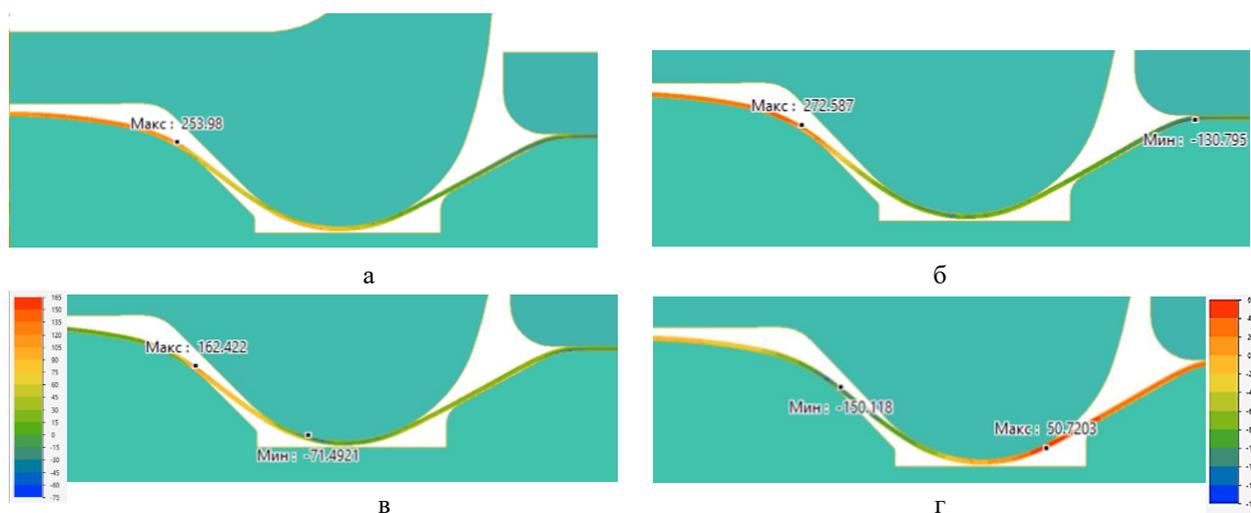


Рис. 5. Распределение компонентов тензора  $\sigma_{rr}$  (а),  $\sigma_{\varphi\varphi}$  (б),  $\sigma_{zz}$  (в),  $\sigma_{rz}$  (г)  
Fig. 5. Distribution of tensor components  $\sigma_{rr}$  (а),  $\sigma_{\varphi\varphi}$  (б),  $\sigma_{zz}$  (в),  $\sigma_{rz}$  (г)

По рис. 5, а-в видно, что максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\phi\phi}$ ,  $\sigma_{zz}$  равны соответственно 254, 273 и 162 МПа, то есть они все положительны и являются напряжениями растяжения. Напряжённое состояние характеризуется как трёхосное растяжение и этим оно существенно отличается от состояния одноосного растяжения, характерного для испытания образцов. Из теории разрушения известно, что увеличение уровня растягивающих напряжений приводит к снижению пластичности металла [15]. Но, кроме этого, увеличение направлений по координатным осям, в которых действуют напряжения растяжения, также приводит к такому же эффекту.

Среднее нормальное напряжение может быть рассчитано через компоненты тензора:

$$\sigma = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\phi\phi} + \sigma_{zz}}{3} \quad (3)$$

После расчёта получим 230 МПа, что практически совпадает со значением, определенным в модуле Qform, небольшое расхождение может быть связано с некоторым смещением максимумов компонент тензора.

На рис. 5, г определена также компонента тензора  $\sigma_{rz}$ , для которой максимальное значение равно 51 МПа, а минимальное -150 МПа. Смена знака компонента связана с изменением знака кривизны: выпуклость диска меняется на вогнутость.

В настоящее время вероятность разрушения заготовки в любой момент времени оценивают в том числе по следующим двум показателям – напряжённому состоянию  $k$  и коэффициенту Лоде  $\mu_\sigma$ .

Показатель напряжённого состояния представляет собой отношение среднего напряжения к интенсивности касательных напряжений:

$$k = \frac{\sigma}{T} \quad (4)$$

где  $\sigma$  – среднее напряжение;  
 $T$  – интенсивность касательных напряжений, которую можно определить через интенсивность напряжений  $\sigma_u$ ,

$$T = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Показатель напряжённого состояния  $k$  характеризует относительный уровень нормальных напряжений: при  $k > 0$  преобладают нормальные растягивающие напряжения, при  $k < 0$  – сжимающие. При увеличении этого показателя пластичность материала снижается.

Коэффициент Лоде  $\mu_\sigma$  позволяет определить, какой вид напряжённого состояния реализуется в конкретной точке – растяжение, сжатие или сдвиг. Коэффициент Лоде рассчитывается по формуле

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 \quad (6)$$

Значение  $\mu_\sigma = +1/-1$  соответствует напряжённому состоянию осесимметричного сжатия/растяжения, при  $\mu_\sigma = 0$  реализуется схема плоского напряжённого состояния [16]. Так как приведённые выше показатели безразмерные, они позволяют оценить напряжённое состояние и вероятность разрушения заготовки из материалов с разным уровнем пластических свойств.

Рассчитанные по приведённым выше формулам значения показателей напряжённого состояния для перехода штамповки приведены в табл. 1.

Программой Qform предусмотрена возможность определения толщины детали. Поскольку эта величина оказывается переменной по контуру, назначены контрольные точки, отображенные на рис. 6, а, на рис. 6, б отображён пример оценки толщины в контрольной точке.

Как видно из приведенных данных, в месте размещения прижима утонение минимально, большее утонение испытывает металл в точках 1 и 2, при этом в месте перегиба утонение наибольшее, что может иметь негативные последствия. В идеальном варианте желательно, чтобы деталь сохраняла исходную толщину, либо утонение должно происходить равномерно без локализации опасных сечений.

Таблица 1. Значения показателя напряжённого состояния  $k$  и коэффициента Лоде  $\mu_\sigma$   
 Table 1. Values of the stress state indicator  $k$  and the Lode coefficient  $\mu_\sigma$

Номер точки	Среднее напряжение $\sigma$	Интенсивность напряжений $\sigma_u$	Главные нормальные напряжения			Интенсивность касательных напряжений $T$	$k$	$\mu_\sigma$
			$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$			
1	146	232	235	232	3	134,1	1,088	0,97
2	213	269,3	321	272,6	64	155,7	1,37	0,62
3	35,5	178	151	-9	-42	102,9	0,35	-0,66
4	-58,5	134	30	-63	-131	77,5	-0,75	-0,16

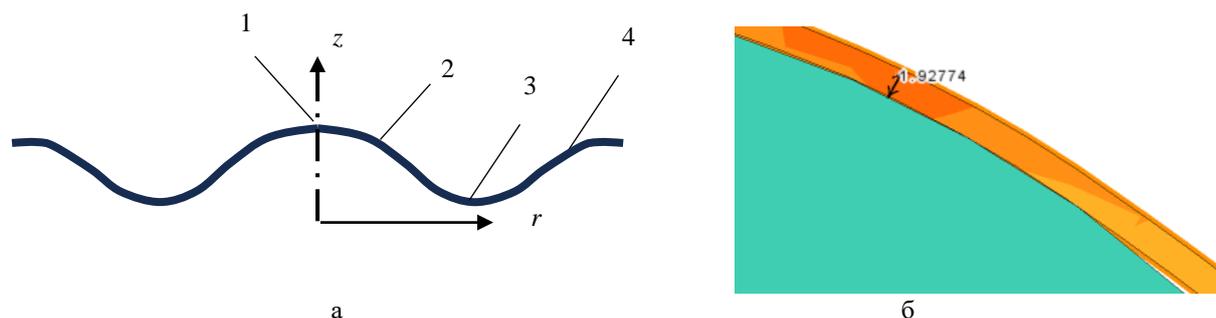


Рис. 6. Схема размещения контрольных точек (а) и пример распределения толщины заготовки в области размещения контрольной точки 2 (б)

Fig. 6. The layout of the control points (a) and an example of the distribution of the blank thickness in the area of the control point 2 (б)

Таблица 2. Рассчитанные параметры по контуру заготовки с начальной толщиной 2,2 мм

Table 2. Calculated parameters along the outline of the blank with an initial thickness of 2,2 mm

Номер точки	Толщина, мм	Абсолютное утонение, мм	Относительное утонение, %	Эффективная пластическая деформация $\epsilon$
1	2,027	0,173	7,9	0,082
2	1,928	0,272	12,4	0,124
3	2,118	0,082	3,7	0,038
4	2,185	0,015	0,7	0,007

Полученное в приведённых выше расчётах положение опасного сечения находит подтверждение в практике работы. Наиболее часто разрушение заготовки происходит в районе точки 2 на заготовке (рис. 7).



Рис. 7. Разрушение заготовки в точке 2 на первом переходе штамповки

Fig. 7. Destruction of the blank at point 2 at the first stamping transition

В областях повышенного утонения заготовки толщина уменьшается, но из условия постоянства объёмов должен увеличиваться один или два оставшихся размера. Ими являются два размера, формирующие площадь заготовки. Действительно, если площадь проекции детали на горизонтальную по-

верхность остается одинаковой, то реальная площадь детали увеличивается за счет изгибов. В этом случае более правильно будет проводить моделирование в 3D-постановке, однако оно занимает длительное время. Для предварительного анализа процесса вытяжки подобных деталей достаточно решить задачу в 2D и, уже зная примерное положение опасного сечения, корректировать граничные условия в 3D-постановке (например, измельчить сетку в этом месте).

Продолжением работы может быть исследование напряжённого состояния на последующих переходах вытяжки и построение на основе полученных данных диаграмм предельной деформации для каждого перехода.

### Выводы

При проведении компьютерного моделирования установлена область, расположенная в зоне перегиба заготовки (точка 2), в которой происходит максимальное утонение. Эффективная пластическая деформация  $\epsilon_p$  здесь равна 0,125, среднее нормальное напряжение  $\sigma$  равно +213 МПа. Максимумы значений локализованы близко к точке перегиба, где кривизна меняет знак, эту точку можно считать опасным сечением. При полученном в опытах относительном удлинении  $\delta = 21\%$  расчётная эффективная пластическая деформация  $\epsilon_p$  равна 0,190.

В точке 2 максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\phi\phi}$ ,  $\sigma_{zz}$  положительны и равны 254, 273 и 162 МПа, рассчитанный показатель напряжённого состояния  $k$  составляет 1,37, коэффициент Лоде  $\mu_\sigma$  равен

0,62, соответственно, наблюдается трёхосное растяжение, что может привести к снижению пластичности и дальнейшей локализации эффективной пластической деформации. Локализация деформации в одной области может иметь негативные последствия при дальнейшей эксплуатации.

#### Список источников

1. Грязев М.В., Ларин С.Н., Пасынков А.А. Оценка влияния анизотропии материала на силу вытяжки с прижимом через радиальную матрицу // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 2. С. 244–248.
2. Ershov A. A., Loginov Y. N. Use of the program PAM-STAMP to study the effect of the as-received condition of a material on its formability during stamping // *Metalurgist*. 2014, vol. 58, Iss. 3-4, pp. 162-166.
3. Hyung-Rim Lee, Myoung-Gyu Lee, Namsu Park. Effect of evolutionary anisotropic hardening on the prediction of deformation and forming load in incremental sheet forming simulation // *Thin-Walled Structures*. 2023, vol. 193, 111231. DOI: 10.1016/J.TWS.2023.111231.
4. Разработка способа получения тонкостенных деталей сферической формы из алюминиевого сплава 1580 / Сидельников С.Б., Бер В.И., Лопатина Е.С. и др. // Цветные металлы. 2023. № 7. С. 83–89. DOI: 10.17580/tsm.2023.07.11.
5. Thomas W., Oenoki T., Altan T. Process simulation in stamping - Recent applications for product and process design // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, vol. 98, no. 2, pp. 232-243. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00204-6.
6. Логинов Ю.Н., Котов В.В., Замираева Ю.В. Последовательность формоизменения металла в операции глубокой вытяжки тонкостенной заготовки с отверстием // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2018. № 7. С. 35–38.
7. Логинов Ю. Н., Каменецкий Б. И., Студенок Г. И. Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 26–28.
8. Effects of independent radial pressure loading paths on cup thickness distribution / Liu X.-J., Cong Y.-L., Li F., Xu Y.-C., Yuan S.-J. // *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010, vol. 41, Iss. 3, pp. 917-922.
9. Liu W., Chen Y. Z., Yuan S. J. Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 89, Iss. 5, pp. 2011-2020.
10. Особенности численного моделирования упругопластического выпучивания полусферических оболочек при нагружении жестким индентором / Баженов В.Г., Демарева А.В., Жестков М.Н. и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 2. С. 22–33.
11. Разработка баз данных материалов САПР бездефектных технологий листовой штамповки / Елисеев В.В., Гольцев А.М., Хливненко Л.В. и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т.13. №3. С.102-106.
12. Файфер И.Н., Логинов Ю.Н. Цифровое моделирование многопереходной глубокой вытяжки полусферической детали при различных условиях трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. № 10. С. 448–453.
13. Файфер И.Н., Салихьянов Д.Р. Влияние термической обработки и времени хранения на анизотропию механических свойств высокопрочной стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1) // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды XII общероссийской научно-практической конференции. Сер. «Библиотека журнала "Военмех. Вестник БГТУ"». СПб., 2020. Т. 1. С. 225-231.
14. Implementation of the bai and Wierzbicki fracture criterion in QFORM and its application for cold metal forming and deep drawing technology / Gladkov Y., Peshekhodov I., Vucetic M., Bouguecha A., Behrens B.-A. // *MATEC Web of Conferences*. "4th International Conference on New Forming Technology, ICNFT 2015". 2015. No. 12009. DOI: 10.1051/mateconf/20152112009.
15. Shveikin V.P., Smirnov S.V. Strain hardening and plasticity of low-carbon steels with a heterophase structure: II. Effect of the state of stress on the plasticity // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 3, pp. 193-196. DOI: 10.1134/S0036029510030080.
16. Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В. Комплекс испытаний для исследования влияния напряженного состояния на предельную пластичность металла при повышенной температуре // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. №3. С. 146–164.

#### References

1. Gryazev M.V., Larin S.N., Pasinkov A.A. Assessment of the effect of anisotropy of the material on the force of drawing with clamping through a radial matrix. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2018; (2):244-248. (In Russ)
2. Ershov A. A., Loginov Y. N. Use of the program PAM-STAMP to study the effect of the as-received condition of a material on its formability during stamping. *Metalurg* [Metallurgist]. 2014;58(3-4):162-166. (In Russ)
3. Hyung-Rim Lee, Myoung-Gyu Lee, Namsu Park. Effect of evolutionary anisotropic hardening on the prediction of deformation and forming load in incremental sheet forming simulation. *Thin-Walled Structures*. 2023;193:111231. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111231.
4. Sidelnikov S.B., Ber V.I., Lopatina E.S., Voroshilova M.V. Development of a method for obtaining thin-walled spherical parts from aluminum alloy 1580. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2023;(7):83-89. DOI: 10.17580/tsm.2023.07.11.

5. Thomas W., Oenoki T., Altan T. Process simulation in stamping - Recent applications for product and process design. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;(98(2)):232-243. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00204-6.
6. Loginov Yu.N., Kotov V.V., Zamaraeva Yu.V. The sequence of metal shaping in the operation of deep drawing of a thin-walled blank with a hole. *Kuznechno-stampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem* [Forging and stamping production. Processing of materials by pressure], 2018;(7):35-38. (In Russ.)
7. Loginov Yu.N., Kamenetsky B.I., Studenok G.I. Modeling of the deformed state of a round plate during extrusion. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 2006;(3):26-28. (In Russ.)
8. Liu X.-J., Cong Y.-L., Li F., Xu Y.-C., Yuan S.-J. Effects of independent radial pressure loading paths on cup thickness distribution. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010;(41(3)):917-922.
9. Liu W., Chen Y. Z., Yuan S. J. Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;(89(5)):2011-2020.
10. Bazhenov V. G., Demareva A.V., Zhestkov M.N., Kibets A.I. Features of numerical modeling of elastic-plastic buckling of hemispherical shells under loading with a rigid indenter. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2016;(2):22-33. (In Russ.)
11. Eliseev V.V., Goltsev A.M., Khlivnenko L.V., Rukin Yu.B. Development of databases of CAD materials of defect-free sheet stamping technologies. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of the Voronezh State Technical University], 2017;13(3):102-106. (In Russ.)
12. Faifer I.N., Loginov Yu.N. Digital modeling of a multi-transition deep drawing of a hemispherical part under various friction conditions. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyeni* [Blanking productions in mechanical engineering], 2023;21(10):448-453. (In Russ.)
13. Fifer I.N., Salikhianov D.R. The effect of heat treatment and storage time on the anisotropy of the mechanical properties of high-strength steel 42X2GSNMA (VKS-1). *Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva special'nogo naznacheniya: trudy XII obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ser. Biblioteka zhurnal "Voennemkh.Vestnik BGTU"* [Innovative technologies and special-purpose equipment. Proceedings of the XII All-Russian scientific and practical conference. Ser. "Library of the journal "Voennemkh. Vestnik of BSTU"]. St. Peterburg, 2020;1:225-231. (In Russ.)
14. Gladkov Y., Peshekhodov I., Vucetic M., Bouguecha A., Behrens B.-A. Implementation of the bai and Wierzbicki fracture criterion in QFORM and its application for cold metal forming and deep drawing technology. *MATEC Web of Conferences*. "4th International Conference on New Forming Technology, ICNFT 2015". 2015:12009. DOI: 10.1051/mateconf/20152112009. (In Russ.)
15. Shveikin V.P., Smirnov S.V. Strain hardening and plasticity of low-carbon steels with a heterophase structure: II. Effect of the state of stress on the plasticity. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010;(3):193-196. DOI: 10.1134/S0036029510030080. (In Russ.)
16. Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Nesterenko A.V. A set of tests to study the effect of the stress state on the ultimate plasticity of metal at elevated temperature. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Vestnik of PNRPU. Mechanics], 2015;(3):146-164. (In Russ.)

Поступила 07.05.2024; принята к публикации 03.09.2024; опубликована 24.12.2024  
Submitted 07/05/2024; revised 03/09/2024; published 24/12/2024

**Файфер Игорь Николаевич** – аспирант,

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;  
ПАО «Машиностроительный завод имени М. И. Калинина», Екатеринбург, Россия.

Email: i.n.faifer@urfu.ru. ORCID 0000-0002-0163-7420

**Логинов Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор,

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;  
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия.

Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7222-2521

**Igor N. Faifer** – Postgraduate Student,

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;  
PJSC Machine-Building Plant named after M. I. Kalinin, Yekaterinburg, Russia,

Email: i.n.faifer@urfu.ru. ORCID 0000-0002-0163-7420

**Yuri N. Loginov** – DrSc (Eng.), Professor,

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;  
M.N. Miheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7222-2521