СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ
STRUCTURAL MECHANICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND BUILDINGS

2024. 20(4). 342–354

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)
HTTP://JOURNALS.RUDN.RU/STRUCTURAL-MECHANICS

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-4-342-354
УДК 621.981.1
EDN: TCWWPU

Научная статья / Research article

Проектирование тонкостенных деталей одинарной кривизны для использования в облегченных конструкциях

Ю.А. Морозов[1] ✉, **Б.Ф. Белелюбский**[2]

[1] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), *Москва, Россия*
[2] Московский политехнический университет (Московский Политех), *Москва, Россия*
✉ akafest@mail.ru

Поступила в редакцию: 26 февраля 2024 г.
Принята к публикации: 15 июня 2024 г.

Аннотация. Цель исследования — нахождение минимальной (критической) кривизны листового материала, допускающей гибку без разрушения гнутого элемента (образование продольных трещин) и определяемой совокупной «игрой» двух деформационных параметров — утонение, приводящее к ослаблению сечения детали, и деформационное упрочнение материала, характеризуемое интенсивностью деформаций. Проанализирована существующая схема листовой гибки в совокупности с кинематикой деформационного изменения первоначальных радиусов детали ввиду неразрывности сжимающих (радиальная) и растягивающих (тангенциальная) деформаций. При допущении гипотезы плоских сечений в условиях листовой гибки разработана математическая модель, позволяющая оценить деформационные и геометрические (утонение) параметры при формообразовании торовой поверхности различной кривизны. Выявлен уровень радиальных напряжений с учетом деформационного упрочнения и утонения изгибаемого материала, приводящих к исчерпанию его несущей способности (разрушение), где критерием пластичности являются механические свойства конкретного материала, полученные в испытаниях на растяжение (пределы текучести и прочности, относительное удлинение), аппроксимированные степенной зависимостью. Полученные результаты найдут применение при проектировании силовых облегченных конструкций; в моделировании напряженно-деформированного состояния металла при разработке технологических процессов листовой штамповки (гибки) для вычисления величины утонения, оценки уровня радиальных напряжений гибки металла по торцевой кромке давящего пуансона, а также при проектировании гибочной оснастки.

Ключевые слова: листовая гибка, радиус кривизны, утонение, радиальное напряжение, пластическая потеря устойчивости, разрушение материала

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Нераздельное соавторство.

Для цитирования: *Морозов Ю.А., Белелюбский Б.Ф.* Проектирование тонкостенных деталей одинарной кривизны для использования в облегченных конструкциях // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 4. С. 342–354. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-342-354

Морозов Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-13 технологии обработки материалов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426, ORCID: 0000-0001-9229-7398; e-mail: akafest@mail.ru

Белелюбский Борис Феликсович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Московский политехнический университет (Московский Политех), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2007-1003, ORCID: 0000-0002-1702-707x; e-mail: alib@bk.ru

© Морозов Ю.А., Белелюбский Б.Ф., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode

Design of Thin-Walled Single-Curvature Parts for Use in Lightweight Structures

Yury A. Morozov[1] ✉ **Boris F. Belelyubskiy**[2]

[1] Bauman Moscow State Technical University, *Moscow*, *Russia*
[2] Moscow Polytechnic University, *Moscow*, *Russia*
✉ akafest@mail.ru

Received: February 26, 2024
Accepted: June 15, 2024

Abstract. The aim of the study — the purpose of the study was to find the minimum (critical) curvature of sheet material, to which it can be bent without fracture (formation of longitudinal cracks) and which is determined by the combined «play» of two deformational parameters: thinning, responsible for cross-section weakening, and strain hardening of the material, characterized by the intensity of deformations. The existing sheet bending pattern is analyzed with regard to the kinematics of deformational changes in the initial radii of the part due to the continuity of compressive (radial) and tensile (tangential) deformations. Assuming the Bernoulli's hypothesis in sheet bending conditions, a mathematical model has been developed for estimating the deformational and geometric (thinning) parameters during the formation of a torus surface of various curvatures. The level of radial stresses has been identified taking into account strain hardening and thinning of the bent material, which lead to the exhaustion of its load-bearing capacity (fracture), where the plasticity criterion is the mechanical properties of a particular material obtained in tensile tests (yield and strength limits, relative elongation), approximated by a power law. The obtained results can be applied in the design of lightweight power structures; in modeling the stress-strain state of metal when developing technological processes of sheet stamping (bending) for calculating the magnitude of thinning, assessing the level of radial stresses in metal bending along the end edge of a pressing punch, as well as when designing bending equipment.

Keywords: sheet bending, radius of curvature, thinning, radial stress, plastic buckling, material failure

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution. Undivided co-authorship.

For citation: Morozov Yu.A., Belelyubskiy B.F. Design of thin-walled single-curvature parts for use in lightweight structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2024;20(4):342–354. (In Russ.). http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-342-354

1. Введение

Современное строительство зданий и сооружений предусматривает использование облегченных силовых элементов, среди них светопрозрачные фасадные или навесные системы, образованные стеклянными панелями, упакованными каркасной обвязкой, которую чаще всего выполняют из алюминиевых сплавов или стали (в зависимости от интенсивности действующих нагрузок).

Изготовление алюминиевых профилей прессованием позволяет спроектировать любую их конфигурацию, но высокая стоимость инструментальной оснастки также отражается и на стоимости подобных изделий.

Производство стальных профилей не требует какого-то инструмента индивидуального исполнения и может осуществляться различными схемами формоизменения (гибка, профилирование и пр.). В этом отношении изготовление гнутых профилей является аналогичным производству тонкостенных деталей одинарной кривизны методами листовой штамповки, обеспечивающей требуемую конфигурацию деталей, которые широко применяются в авиа-, судо-, автопромышленности [1; 2].

Yury A. Morozov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Processing Technologies (MT-13), Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3189-5426, ORCID: 0000-0001-9229-7398; e-mail: akafest@mail.ru
Boris F. Belelyubskiy, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2007-1003, ORCID: 0000-0002-1702-707X; e-mail: alib@bk.ru

При этом актуальным является вопрос определения минимально возможного радиуса изгиба согнутой детали, который в пределе стремится к нулю (рис. 1).

Иногда уменьшение предельно допустимого радиуса изгиба диктуется необходимостью снижения материалоемкости изделия, условиями монтажа и др. При этом использование чрезвычайно малых радиусов гибки приближает конфигурацию листовой профильной детали (уголки, швеллеры и др.) к сечению прессованных профилей, т.е. к показателям большей жесткости [3; 4].

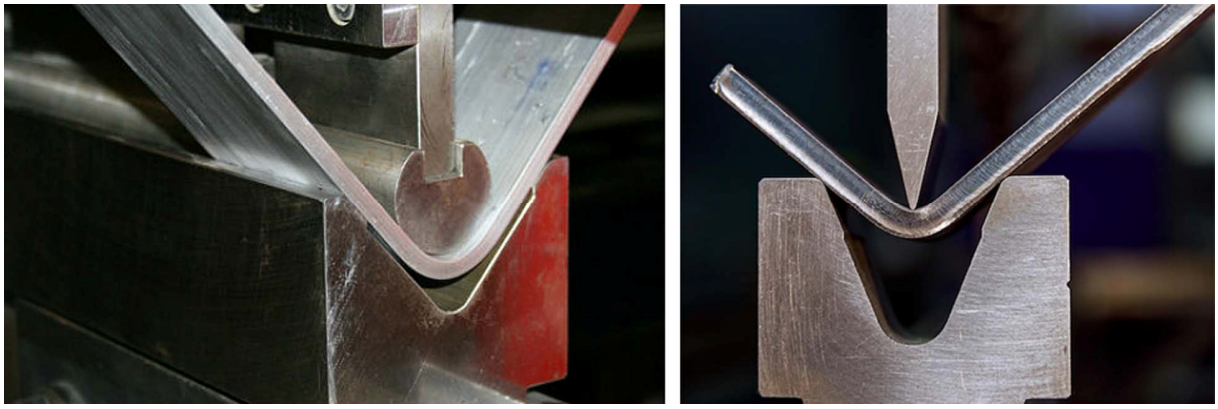

Рис. 1. Схема V-образной гибки в штампе
И с т о ч н и к: https://ugselmash.ru/uslugi/gibka-metalla/gibka-stali; https://ipmet.ru/razd/metalloobrabotka/gibka-metalla

Figure 1. V-die bending
S o u r c e: https://ugselmash.ru/uslugi/gibka-metalla/gibka-stali; https://ipmet.ru/razd/metalloobrabotka/gibka-metalla

Основной задачей в данном случае является предотвращение разрушения заготовки при ее изгибе, обычно происходящее на выпуклой поверхности радиуса R (по биссектрисе угла), вследствие больших деформаций растяжения и утонения материала (рис. 2)[1].

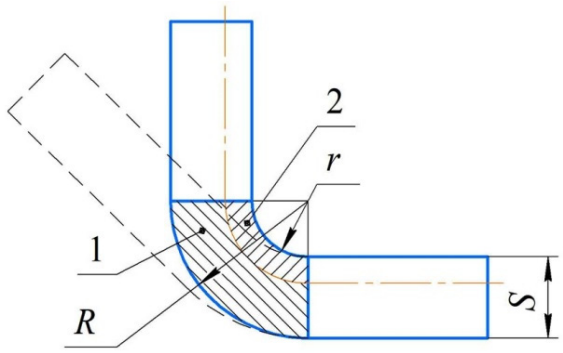

Рис. 2. Сечение изогнутой заготовки:
1, 2 — зоны тангенциальных напряжений растяжения и сжатия
И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым

Figure 2. Section of a curved workpiece:
1, 2 — zones of tangential tensile and compressive stresses
S o u r c e: made by Yu.A. Morozov

[1] *Ершов В.И.* Интенсификация формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Высшая школа, 1989. 85 с.

Утонение приводит к снижению прочности детали и является дополнительной причиной концентрации напряжений и усталостного разрушения (обычно допустимое утонение ограничивается 20 %).

Технологически процесс гибки (изменение кривизны листового материала) является весьма простой операцией, достаточно освященной в работах отечественных[2] и зарубежных авторов, предлагающих различные методики определения утонения материала и его деформационного упрочнения [5–9].

Однако решение задачи минимального радиуса изгиба требует комплексного рассмотрения кинематики процесса и анализа напряженно-деформированного состояния металла, обусловленного совокупной «игрой» двух деформационных параметров — утонение, приводящее к ослаблению сечения детали, и деформационное упрочнение материала, характеризуемое интенсивностью деформаций [10–14].

Следует отметить, что современное программное обеспечение позволяет решать подобные задачи в диалоговом режиме компьютерного моделирования с использованием численных методов или метода конечных элементов [15; 16]. При этом следует учесть, что основой каждого подобного ПО является математический алгоритм, основанный на определенных моделях и допущениях. В связи с этим рассмотрим поведение металла в указанных условиях формоизменения.

2. Метод

Формоизменение гибкой приводит к появлению в материале двух противоположных деформационных процессов: растяжения и сжатия, обуславливающих деформационное изменение первоначальных радиусов R_1 и R_2 (рис. 3)[3] [17; 18].

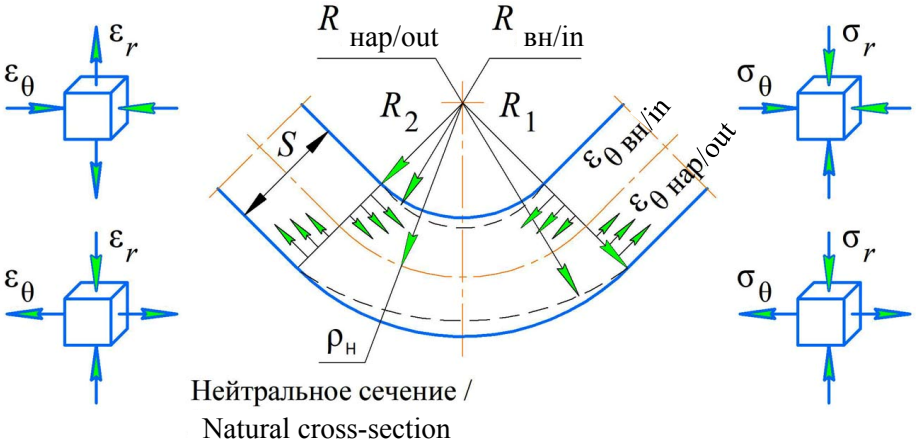

Рис. 3. Распределение тангенциальных деформаций по сечению полосы
И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым

Figure 3. Distribution of tangential deformations over the strip section
S o u r c e: made by Yu.A. Morozov

[2] *Попов Е.А.* Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.; *Зубцов М.Е.* Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.; *Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.* Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

[3] *Кохан Л.С., Лебедев Н.Н., Морозов Ю.А., Мочалов Н.А.* Проектирование калибров сортовых станов и операций листовой штамповки. М.: МГВМИ, 2007. 340 с.

Наружный радиус R_1 под действием радиальной деформации $\varepsilon_{r\,\text{нар}} < 0$ уменьшается, принимая новое условное значение $R_{\text{нар}}$. Внутренний же радиус R_2 увеличивается до $R_{\text{вн}}$ под действием соответствующей радиальной деформации $\varepsilon_{r\,\text{нар}} > 0$

$$\left.\begin{aligned} R_{\text{нар}} &= R_1 + \left(R_1 - \rho_{\text{н}}\right)\varepsilon_{r\,\text{нар}} \\ R_{\text{вн}} &= R_2 + \left(\rho_{\text{н}} - R_2\right)\varepsilon_{r\,\text{вн}} \end{aligned}\right\}. \tag{1}$$

Величина утонения будет определяться величиной тангенциальных деформаций, действующих в растянутых и сжатых слоях заготовки, вследствие чего первоначальные радиусы R_1 и R_2 принимают новые продеформированные значения — соответственно $R_{\text{нар}}$ и $R_{\text{вн}}$ с границей раздела в нейтральном сечении $\rho_{н}$, в котором тангенциальные деформации ε_θ равны нулю:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{\theta\,\text{нар}} &= \frac{R_{\text{нар}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} - 1 \\ \varepsilon_{\theta\,\text{вн}} &= \frac{\rho_{\text{н}} - R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} = 1 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} \end{aligned}\right\}. \tag{2}$$

Совместное решение (1) и (2) устанавливает выражения наружного и внутреннего радиусов (при допущении фиксированного внутреннего радиуса $R_2 = R_{\text{вн}}$):

$$\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} = \frac{\left(2 - Z_1\right) - \sqrt{4Z_1 - 3Z_1^{\,2}}}{\sqrt{4Z_1 - 3Z_1^{\,2}} - Z_1} + 1, \tag{3а}$$

$$\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} = 1 + \frac{\dfrac{R_2}{R_1} - Z_1}{Z_1}, \tag{3б}$$

где $Z_1 = \rho_{\text{н}} / R_1$ — коэффициент, определяющий положение нейтральной поверхности.

Тогда из условия равенства по модулю тангенциальных деформаций в растянутых и сжатых слоях гнутого элемента получаем деформационную модель изгиба, позволяющую последовательно определить положение нейтральной поверхности Z_1 в сечении и установить окончательную толщину полосы для разных значений первоначальных радиусов R_1 / R_2 :

$$\varepsilon_{\theta\,\text{нар}} = -\varepsilon_{\theta\,\text{вн}} \quad \text{или} \quad \frac{\left(2 - Z_1\right) - \sqrt{4Z_1 - 3Z_1^{\,2}}}{\sqrt{4Z_1 - 3Z_1^{\,2}} - Z_1} = \frac{\dfrac{R_2}{R_1} - Z_1}{Z_1}. \tag{4}$$

С использованием величины утонения при оценке радиальных напряжений изгибаемого материала по торцевой кромке давящего пуансона, можно рассчитать предельный и критический радиус кривизны, допускающий гибку без разрушения гнутого элемента (образование продольных трещин).

Рассмотрим гибку детали на кривизну $R_1 / R_2 = 1{,}1$, определяющую следующий характер равновесия тангенциальных деформаций (4):

$$\frac{(2-Z_1)-\sqrt{4Z_1-3Z_1^2}}{\sqrt{4Z_1-3Z_1^2}-Z_1}=\frac{\frac{1}{1{,}1}-Z_1}{Z_1}.$$

Итерационным перебором определяется коэффициент положения нейтральной поверхности $Z_1=0{,}9535$ (рис. 4).

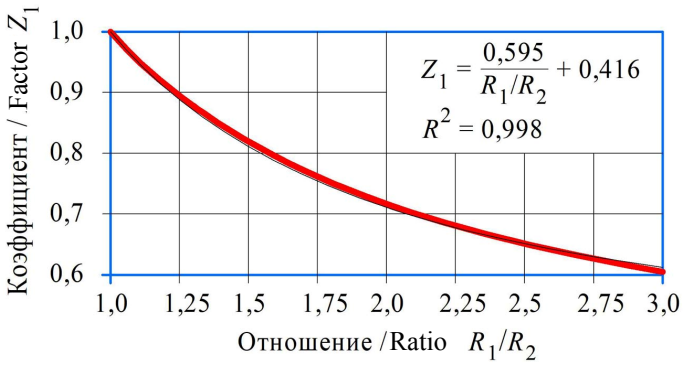

Рис. 4. Коэффициент нейтральной поверхности, Z_1
И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым, Б.Ф. Белелюбским
Figure 4. Neutral surface factor, Z_1
S o u r c e: made by Yu.A. Morozov, B.F. Belelyubskiy

Подставляя данное значение в выражения (3а) и (3б), устанавливается относительная величина деформированных радиусов:

$$\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}}=\frac{(2-Z_1)-\sqrt{4Z_1-3Z_1^2}}{\sqrt{4Z_1-3Z_1^2}-Z_1}+1=$$

$$=\frac{(2-0{,}9535)-\sqrt{4\cdot0{,}9535-3\cdot0{,}9535^2}}{\sqrt{4\cdot0{,}9535-3\cdot0{,}9535^2}-0{,}9535}+1=1{,}0466;$$

$$\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}}=1+\frac{\frac{R_2}{R_1}-Z_1}{Z_1}=1+\frac{\frac{1}{1{,}1}-0{,}9535}{0{,}9535}=0{,}9534.$$

При исходной толщине листового металла $S=0{,}8$ мм и фиксированном внутреннем радиусе гибки $R_{\text{вн}}/\rho_{\text{н}}=\text{const}$ устанавливается радиус торового скругления давящего пуансона и радиус нейтральной поверхности

$$r_n=R_2=R_{\text{вн}}=\frac{S}{R_1/R_2-1}=\frac{0{,}8}{1{,}1-1}=8\ \text{мм};$$

$$\rho_{\text{н}}=Z_1R_1=Z_1\frac{R_1}{R_2}R_2=0{,}9535\cdot1{,}1\cdot8=8{,}39\ \text{мм}.$$

Наружный радиус торового скругления

$$R_{\text{нар}} = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}}\rho_{\text{н}} = 1,0466 \cdot 8,39 = 8,78 \text{ мм}.$$

Коэффициент утонения (рис. 5) [19]

$$\frac{S'}{S} = \frac{Z_1}{1,0 - \dfrac{1}{R_1/R_2}}\left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} - \frac{r_n}{\rho_{\text{н}}}\right) = \frac{0,9535}{1,0 - \dfrac{1}{1,1}}\left(1,0466 - \frac{8}{8,39}\right) = 0,976.$$

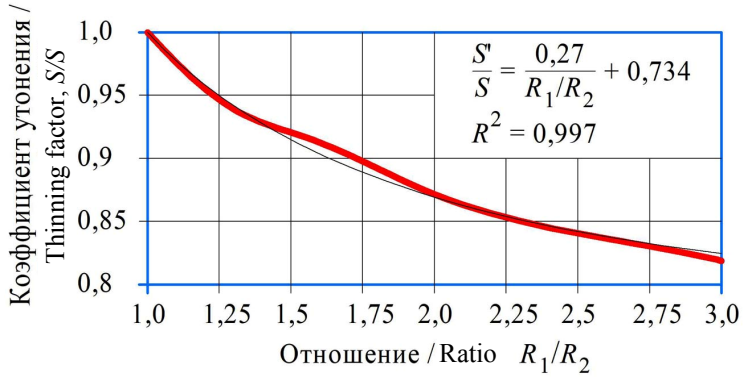

Рис. 5. Коэффициент утонения листового металла, *S′/S*
И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым, Б.Ф. Белелюбским
Figure 5. Thinning factor of sheet metal, *S′/S*
S o u r c e: made by Yu.A. Morozov, B.F. Belelyubskiy

Упрочнение материала при гибке определяется интенсивностью деформаций, т.е. суммарным значением тангенциальных деформаций на наружной и внутренней поверхностях изгибаемой полосы

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\theta\,\text{нар}} + \varepsilon_{\theta\,\text{вн}} = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} = 1,0466 - 0,9534 = 0,093 \ (9,3\ \%).$$

Принимаем модельным материалом сталь 20[4] [20], пластичность которой будет устанавливаться механическими свойствами, полученными в испытаниях на растяжение и аппроксимированными степенной зависимостью

$$\sigma_{\text{T}} = \sigma_{0,2} + A\varepsilon_i^{\,n} = 245 + 22,4 \cdot 9,3^{0,62} = 334,3 \text{ МПа},$$

где $\sigma_{0,2} = 245$ МПа[5] — условный предел текучести стали 20; A, n — коэффициенты упрочнения материала [21].

[4] *Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М., Силаева В.И.* Материаловедение. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.

[5] Сталь конструкционная // Марочник стали и сплавов. URL: http://splav-kharkov.com/choose_type_class.php?type_id=3 (дата обращения: 23.04.2024).

$$n = \frac{\sigma_в \delta}{\sigma_в - \sigma_{0,2}} = \frac{410 \cdot 0,25}{410 - 245} = 0,62;$$

$$A = \frac{\sigma_в - \sigma_{0,2}}{\delta^n} = \frac{410 - 245}{25^{0,62}} = 22,4,$$

где $\sigma_в = 410$ МПа — предел прочности стали 20; $\delta = 25$ % — относительное удлинение при разрыве.

Радиальное напряжение при V-образной гибке листового материала на угол 90 градусов ($\alpha = \pi/2$) с использованием коэффициента контактного трения $f = 0,2$ (табл. 1) [22]:

$$\sigma_{\rho max} = \frac{\sigma_Т}{2\rho_н} \frac{S}{S'/S} e^{f\alpha} = \frac{334,3}{2 \cdot 8,39} \frac{0,8}{0,976} e^{0,2\frac{\pi}{2}} = 22,4 \text{ МПа},$$

где $\sigma_Т$ — сопротивление пластической деформации.

Таблица 1

Напряженно-деформированное состояние металла при гибке

Кривизна изогнутого элемента R_1/R_2	**Коэффициент нейтральной поверхности** $Z_1 = \rho_н/R_1$	**Коэффициент утонения** S'/S	**Интенсивность деформаций** ε_i, **%**	**Радиальные напряжения** $\sigma_{\rho\,max}$, **МПа**
1,1	0,9535	0,976	9,30	22,40
1,3	0,8779	0,938	24,8	78,50
1,5	0,8192	0,919	37,2	137,9
2,0	0,7171	0,871	60,6	290,0
2,5	0,6514	0,840	77,2	432,1
3,0	0,6055	0,819	89,9	558,2

И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым

Table 1

The stress-strain state of the metal during bending

Curvature of a curved element R_1/R_2	**Neutral surface factor** $Z_1 = \rho_н/R_1$	**Thinning factor** S'/S	**Deformation intensity** ε_i, **%**	**Radial stresses** $\sigma_{\rho\,max}$, **МПа**
1.1	0.9535	0.976	9.30	22.40
1.3	0.8779	0.938	24.8	78.50
1.5	0.8192	0.919	37.2	137.9
2.0	0.7171	0.871	60.6	290.0
2.5	0.6514	0.840	77.2	432.1
3.0	0.6055	0.819	89.9	558.2

S o u r c e: made by Yu.A. Morozov

Предельный радиус кривизны, допускающий гибку без разрушения гнутого элемента, будет при достижении радиальных напряжений начального предела текучести материала

$$\sigma_{\rho max} \le \sigma_{0,2} = 245 \text{ МПа}.$$

Критический радиус кривизны, характеризуемый началом разрушения гнутого элемента (образование продольных трещин), будет при радиальных напряжениях, сравнимых с пределом прочности данного модельного материала (рис. 6):

$$\sigma_{\rho\max} < \sigma_{в} = 410 \text{ МПа}.$$

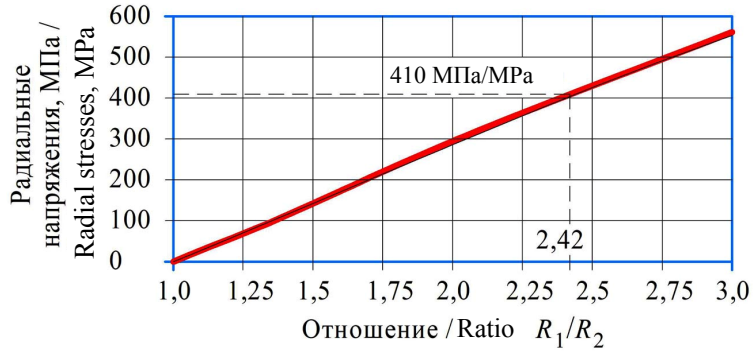

Рис. 6. Радиальные напряжения при изгибе листового материала (сталь 20)
И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым

Figure 6. Radial stresses during bending of sheet material (steel 20)
S o u r c e: made by Yu.A. Morozov

Аппроксимируя распределение радиальных напряжений (среднеквадратичная ошибка определения $R^2 = 0{,}999$), устанавливается критический радиус кривизны $R_1/R_2 \approx 2{,}42$:

$$\sigma_{\rho\,\max} = -10\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 + 324\frac{R_1}{R_2} - 320{,}6 =$$

$$= -10 \cdot 2{,}42^2 + 324 \cdot 2{,}42 - 320{,}6 \approx 405 \text{ МПа}.$$

Для оценки влияния пластических свойств различных металлов ниже рассматриваются некоторые стали, используемые для производства листоштампованных изделий и имеющие различные характеристики прочности и пластичности (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства материалов для листовой штамповки

Параметр	Материал			
	Полоса, ГОСТ 1577–93[1]		Прокат, ГОСТ 1050–88[2]	
	Сталь 08	Сталь 40	Сталь 15	Сталь 20
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	196	335	225	245
Предел прочности $\sigma_{в}$, МПа	320	570	370	410
Относительное удлинение δ, %	33	19	27	25
Коэффициенты упрочнения A / n	6,35/0,85	60,7/0,46	14,9/0,69	22,4/0,62

И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым

Table 2

Mechanical properties of sheet stamping materials

Parameter	Material			
	Strip, GOST 1577–93[6]		Rolled steel, GOST 1050–88[7]	
	Steel 08	Steel 40	Steel 15	Steel 20
Proof strength $\sigma_{0,2}$, МПа / MPa	196	335	225	245
Tensile strength $\sigma_{в}$, MPa	320	570	370	410
Relative elongation δ, %	33	19	27	25
Hardening factors, *A* / *n*	6.35/0.85	60.7/0.46	14.9/0.69	22.4/0.62

S o u r c e: made by Yu.A. Morozov

3. Результаты и обсуждение

Анализ интенсивности распределения радиальных напряжений с учетом пластических свойств рассмотренных материалов устанавливает практически одинаковые критические радиусы кривизны, граничащие с разрушением материала при $R_1/R_2 \le 2{,}41\ldots2{,}45$ (рис. 7).

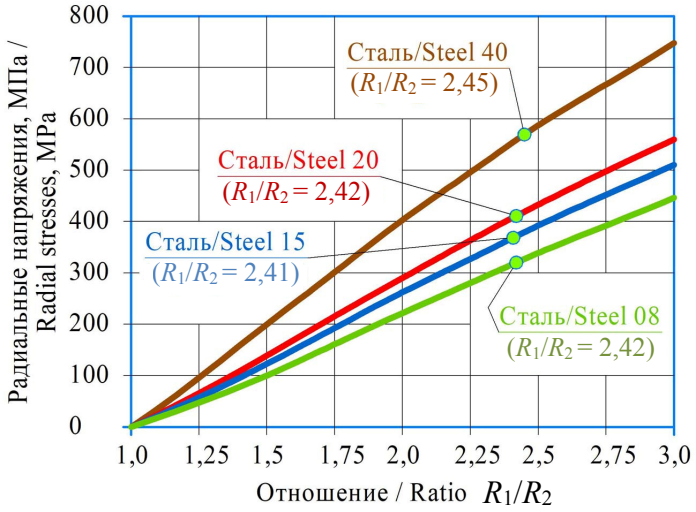

Рис. 7. Радиальные напряжения при изгибе листового материала
И с т о ч н и к: выполнено Ю.А. Морозовым, Б.Ф. Белелюбским

Figure 7. Radial stresses during bending of sheet material
S o u r c e: made by Yu.A. Morozov, B.F. Belelyubskiy

Найденное значение кривизны, также можно представить фактической величиной критического внутреннего радиуса

$$r_{кр} \ge R_2 = \frac{S}{R_1/R_2 - 1} = \frac{S}{(2{,}41\ldots2{,}45) - 1} = (0{,}71\ldots0{,}69)\,S\,.$$

[6] ГОСТ 1577–93. Прокат толстолистовой и широкополосный из конструкционной качественной стали. Минск: Изд-во стандартов, 2002. 24 с.

[7] ГОСТ 1050–88. Группа В32. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной. Конструкционной стали. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. 33 с.

4. Заключение

В статье проведено исследование минимального (критического) внутреннего радиуса кривизны гнутого элемента, допускающего гибку листового материала без разрушения (образование продольных трещин) на основе математической модели напряженно-деформированного состояния формоизменяемой заготовки. На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. На основе гипотезы плоских сечений представлен метод высчитывания критического радиуса, определяемый интенсивностью деформаций на наружной и внутренней поверхностях изгибаемой заготовки (полосы).

2. Численное моделирование, учитывающее деформационные процессы и механические характеристики прочности и пластичности материала, показало устойчивый рост радиальных напряжений, вызывающих разрушение материала при достижении определенной величины критического радиуса кривизны.

Таким образом, предложены математически обоснованные рекомендации для разработки технологических процессов листовой штамповки или проектирования гибочной оснастки с учетом пластических свойств конкретного материала, что позволит снизить материалоемкость изделия с повышением его жесткости.

Для исключения значительного объема итерационных расчетов, приводятся соответствующие аппроксимационные зависимости, позволяющие с высокой точностью 2…3 % определить положение нейтральной поверхности гнутого элемента и величину утонения материала.

Список литературы

1. *Власов С.В., Елатонцев Н.А*. Баланс напряжений и деформаций при холодной гибке листовой судостроительной стали // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 1 (46). С. 36–48. http://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-4

2. *Dang X., He K., Zhang F., Du R*. A new flexible sheet metal forming method of incremental bending // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 15. P. 1298–1305. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.355

3. *Морозов Ю.А*. Разработка конфигурации гнутых профилей при проектировании светопрозрачных конструкций // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. Москва, 12–13 апреля 2018 года: в 2 т. М.: РТУ МИРЭА, 2018. Т. 2. С. 733–7

4. *Морозов Ю.А*. Исследование деформированного состояния материала при производстве гнутых профилей // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. Москва, 11–12 апреля 2019 года: в 2 т. М.: РТУ МИРЭА, 2019. Т. 2. С. 288–295. EDN: IFOSTI

5. *Ahn K*. Plastic bending of sheet metal with tension/compression asymmetry // International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 204–205. P. 65–80. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.022

6. *Barnwal V.K., Lee S.-L., Jisik Choi, Kim J.-H., Barlat F.* Fracture assessment in dual phase and transformation-induced plasticity steels during 3-point bending // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2020. Vol. 110. Article no. 102834. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102834

7. *Zadpoor A.A., Campoli G., Sinke J., Benedictus R*. Fracture in bending — The straining limits of monolithic sheets and machined tailor-made blanks // Materials & Design. 2011. Vol. 32. Issue 3. P. 1229–1241. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.005

8. *Yoshida M., Yoshida F., Konishi H., Fukumoto K*. Fracture limits of sheet metals under stretch bending // International Journal of Mechanical Sciences. 2005. Vol. 47. Issue 12. P. 1885–1896. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.07.006

9. *Романовский В.П*. Справочник по холодной штамповке. М.; Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

10. *Li F.F., Zhu J., Zhang W., Fang G*. Investigation on the inhomogeneous deformation of magnesium alloy during bending using an advanced plasticity model // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 25. P. 5064–5075. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.264

11. *Li S., He J., Gu B., Zeng D., Xia Z.C., Zhao Y., Lin Z.* Anisotropic fracture of advanced high strength steel sheets: Experiment and theory // International Journal of Plasticity. 2018. Vol. 103. P. 95–118. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.01.003

12. *Soyarslan C., Malekipour Gharbi M., Tekkaya A.E.* A combined experimental-numerical investigation of ductile fracture in bending of a class of ferritic-martensitic steel // International Journal of Solids and Structures. 2012. Vol. 49. Issue 13. P. 1608–1626. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.03.009

13. *Thomas B. Stoughton, Jeong Whan Yoon*. A new approach for failure criterion for sheet metals // International Journal of Plasticity. 2011. Vol. 27. Issue 3. P. 440–459. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.07.004

14. *Levy B.S., Van Tyne C.J.* Predicting breakage on a die radius with a straight bend axis during sheet forming // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. Issue 4. P. 2038–2046. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.053

15. *Bate K., Vilson E.* Numerical methods in finite element analysis. Prentice-Hall Publ, 1976; 544 p. 1976. URL: https://sciarium.com/file/268214/ (accessed: 02.03.2024).

16. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с. URL: https://djvu.online/file/DtUw9BqXrtZCc (дата обращения: 02.03.2024).

17. *Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Пунин В.И., Морозов Ю.А.* Гибка профилей на прессах и станах. М.: МГВМИ, 2005. 140 с.

18. *Кохан Л.С., Роберов И.Г., Морозов Ю.А*. Исследование кинематических параметров при гибке листового материала // Технология металлов. 2008. № 10. С. 11–13. EDN: IVMCXK

19. *Морозов Ю.А*. Исследование предельных деформаций листовой вытяжки с учетом пластического утонения и разрушения материала // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 353–359. https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359

20. *Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А*. Справочник по конструкционным материалам. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.

21. *Третьяков А.В., Зюзин В.И*. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справочник. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

22. *Исаченков Е.И*. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

References

1. Vlasov S.V., Yelatontsev N.A. Balans napryazheniy i deformatsiy pri kholodnoy gibke listovoy sudostroitel'noy stali. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(1):36–48. (In Russ.) http://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-4

2. Dang X., He K., Zhang F., Du R. A new flexible sheet metal forming method of incremental bending. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:1298–1305. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.355

3. Morozov Yu.A. Development of the configuration of bent profiles in the design of translucent structures. *Informatics and technologies. Information technologies in industry and informatics. Proceedings of the conference.* Moscow, April 12–13, 2018. Moscow: RTU MIREA Publ.; 2018;2:733–737. (In Russ.) EDN: YWQWPB

4. Morozov Yu.A. Investigation of the deformed state of the material in the production of bent profiles. *Informatics and technologies. Information technologies in industry and informatics. Proceedings of the conference.* Moscow, April 11–12, 2019. Moscow: RTU MIREA Publ.; 2019;2:288–295. (In Russ.) EDN: IFOSTI

5. Ahn K. Plastic bending of sheet metal with tension/compression asymmetry. *International Journal of Solids and Structures*. 2020;204–205:65–80. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.022

6. Barnwal V.K., Lee S.-L., Jisik Choi, Kim J.-H., Barlat F. Fracture assessment in dual phase and transformation-induced plasticity steels during 3-point bending. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020;110:102834. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102834

7. Zadpoor A.A., Campoli G., Sinke J., Benedictus R. Fracture in bending — The straining limits of monolithic sheets and machined tailor-made blanks. *Materials & Design*. 2011;32(3):1229–1241. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.005

8. Yoshida M., Yoshida F., Konishi H., Fukumoto K. Fracture limits of sheet metals under stretch bending. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005;47(12):1885–1896. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.07.006.

9. Romanovskiy V.P. *Handbook of Cold Forming*. Moscow. Leningrad: Mashinostroyeniye. Publ.; 1979. (In Russ.)

10. Li F.F., Zhu J., Zhang W., Fang G. Investigation on the inhomogeneous deformation of magnesium alloy during bending using an advanced plasticity model. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;25:5064–5075. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.264

11. Li S., He J., Gu B., Zeng D., Xia Z.C., Zhao Y., Lin Z. Anisotropic fracture of advanced high strength steel sheets: Experiment and theory. *International Journal of Plasticity*. 2018;103:95–118. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.01.003

12. Soyarslan C., Malekipour Gharbi M., Tekkaya A.E. A combined experimental-numerical investigation of ductile fracture in bending of a class of ferritic-martensitic steel. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49(13): 1608–1626. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.03.009

13. Stoughton T.B., Yoon J.W. A new approach for failure criterion for sheet metals. *International Journal of Plasticity*. 2011;27(3):440–459. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.07.004

14. Levy B.S., Van Tyne C.J. Predicting breakage on a die radius with a straight bend axis during sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(4):2038–2046. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.053

15. Bate K., Vilson E. *Numerical methods in finite element analysis*. Prentice-Hall Publ.; 1976. Available from: https://sciarium.com/file/268214/ (accessed: 02.03.2024).

16. Zenkevich O.K. *The finite element method in engineering*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.) Available from: https://djvu.online/file/DtUw9BqXrtZCc (accessed: 02.03.2024).

17. Lukashkin N.D., Kokhan L.S., Punin V.I., Morozov Yu.A. *Bending of profiles on presses and mills*. Moscow: MGVMI Publ.; 2005. (In Russ.)

18. Kokhan L.S., Roberov I.G., Morozov Yu.A. Investigation into kinematic parameters during bending the sheet materials. *Tekhnologiya metallov*. 2008;(10):11–13. (In Russ.) EDN: IVMCXK

19. Morozov Yu.A. The study of marginal deformations of the leaf extracts with regard to plastic thinning and destruction of the material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(5):353–359. (In Russ.) https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359

20. Arzamasov B.N., Solovyova T.V., Gerasimov S.A. *Handbook of Structural Materials*. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman Publ.; 2005. (In Russ.)

21. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mechanical properties of metals and alloys during pressure treatment. Directory*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1973. (In Russ.)

22. Isachenkov E.I. *Contact friction and lubrication in metal forming*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1978. (In Russ.)