

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 672.32

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-83-89

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

### Определение ширины заготовки в условиях изгиба с растяжением штампуемой детали

Ю.А. Морозов<sup>1\*</sup>, Е.Ю. Верхов<sup>2</sup>
<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Российская Федерация, 107996, Москва, ул. Стромынка, 20

<sup>2</sup>Московский политехнический университет (Московский Политех), Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Большая Семеновская, 38

\*akafest@mail.ru

Поступила в редакцию: 30 октября 2018 г.

Доработана: 29 ноября 2018 г.

Принята к публикации: 16 января 2019 г.

Ключевые слова:

нейтральная поверхность;

радиус гибки;

радиус кривизны;

чистый изгиб;

изгиб с растяжением

Аннотация

**Цели.** В работе рассматривается вопрос определения радиуса нейтральной поверхности изгибаемой полосы при одновременном действии растягивающих напряжений.

**Методы.** При разработке технологических процессов листовой гибки и расчете исходной заготовки (развертки) чаще всего рассматривается плоское напряженное состояние, и предпочтение отдается теории чистого изгиба, предусматривающей равномерное искривление отдельных слоев металла под действием изгибающего момента и пренебрегающей действием поперечных растягивающих сил. Однако в реальности гибка всегда сопровождается скольжением металла по деформирующему инструменту, обуславливающим появление сил трения и создающим в металле сложное нагружение в виде пластического изгиба с растяжением, что дополнительно влияет на смещение нейтральной поверхности, вынуждая опытным путем корректировать технологию изготовления гнутых деталей. Приводятся обзор и анализ наиболее известных работ, посвященных данной тематике, с уточнением распределения контактных напряжений, действующих от внутренней поверхности к центру кривизны, и разрабатывается теория сложного изгиба, позволяющая уточнить радиус нейтральной поверхности в условиях растяжения изгибаемой полосы дополнительными тангенциальными напряжениями.

**Результаты.** Полученные результаты позволяют смоделировать напряженное состояние металла при разработке технологических процессов листовой штамповки и, в частности, оценить конкретное усилие торможения при изгибе (спрямлении) полосы в процессе перетягивания через перетяжные пороги и тормозные ребра штамповой оснастки для устранения возможных дефектов вытягиваемых деталей, а также уточнить размеры заготовки и готового профиля.

### Введение

Гибка является основной формоизменяющей операцией листовой штамповки при производстве тонкостенных деталей одинарной кривизны для различных отраслей машиностроения и народно-

го хозяйства. Сюда относятся многочисленные каркасные детали и элементы обшивки автомобилей, подвижного состава, летательных аппаратов и пр.

Основное внимание уделяется первоначальной ширине листовой заготовки в связи с тем, что в процессе изгиба она получает сжимающие и растягивающие деформации, смещающие нейтральную поверхность от среднего радиуса согнутой детали [1–4].

© Морозов Ю.А., Верхов Е.Ю., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Наиболее известными работами, посвященными определению нейтральной поверхности при гибке, являются исследования И.П. Рене, Р. Хилла, Е.А. Попова, В.П. Романовского и др., использовавших силовой метод равенства радиальных напряжений растянутых и сжатых слоев заготовки, действующих на поверхность произвольного радиуса  $r_i$  (рис. 1) [5].

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_T \ln \frac{r_{\text{нар}}}{r_i} & \text{при } \rho_n < r_i \leq r_{\text{нар}}; \\ \sigma_r = \sigma_T \ln \frac{r_i}{r_{\text{вн}}} & \text{при } r_{\text{вн}} \leq r_i < \rho_n. \end{cases} \quad (1)$$

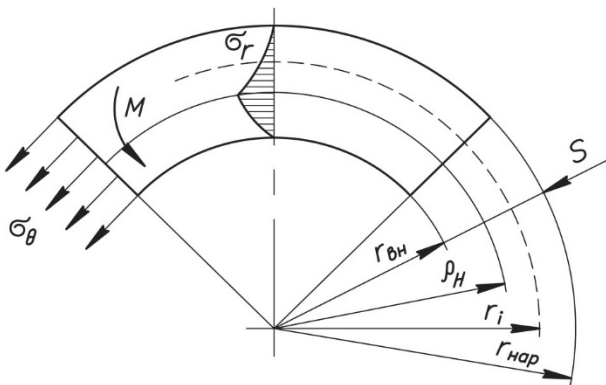


Рис. 1. Определение радиуса нейтральной поверхности изогнутой полосы  
[Figure 1. Determining the radius of the neutral surface of the curved strip]

Так как параметр  $r_i$  изменяется по толщине полосы от  $r_{\text{нар}}$  до  $r_{\text{вн}}$ , становится возможным определить такое его положение, при котором радиальные напряжения в растянутой и сжатой зонах станут равны друг другу:

$$\sigma_T \ln \frac{r_{\text{нар}}}{\rho_n} = \sigma_T \ln \frac{\rho_n}{r_{\text{вн}}},$$

что определяет положение нейтральной поверхности соотношением величин наружного и внутреннего радиусов гнутого элемента (формула Хилла – Ренне):

$$\rho_n = \sqrt{r_{\text{нар}} r_{\text{вн}}}. \quad (2)$$

### 1. Математическая постановка задачи

В теории чистого изгиба растянутые и сжатые слои материала, согласно условию равенства ра-

диальных напряжений, разделяются нейтральной поверхностью в пределах наружного и внутреннего радиусов кривизны полосы.

Данное решение справедливо при условии, что гибка не сопровождается растяжением заготовки. Вместе с тем на практике изгибу заготовки всегда сопутствует некоторое ее растяжение, обусловленное скольжением по деформирующему инструменту и возникновением трения в зоне контакта заготовки с рабочим инструментом. Повышенным растяжением будет характеризоваться гибка в П-образных штампах, если толщина штампуемого материала окажется больше расчетной. При этом широко применяются специфические методы формообразования крупногабаритных деталей из листового и профильного металла, создающие сложное нагружение в виде пластического изгиба с растяжением.

По сравнению с простым изгибом при данном методе формообразования в значительной мере уменьшается влияние упругого восстановления металла при разгрузке на кривизну изогнутого элемента, вследствие чего повышается точность процесса. Кроме того, возможность создания по всему сечению однородных по знаку растягивающих напряжений исключает образование складок на вогнутой поверхности детали.

При изгибе с растяжением радиальные напряжения чистого изгиба справедливо можно рассматривать в качестве контактных напряжений пластического формоизменения, возникающих в зоне соприкосновения заготовки с деформирующим инструментом  $\sigma_r = \sigma_k$  [6]:

$$\rho_n = \sqrt{\frac{r_{\text{нар}} r_{\text{вн}}}{\exp(\sigma_k / \sigma_T)}} = \sqrt{\frac{r_{\text{нар}} r_{\text{вн}}}{1 + \frac{\sigma_\theta S}{\sigma_T r_{\text{вн}}}}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала полосы;  $\sigma_k$  – контактные (радиальные) напряжения на внутренней поверхности полосы

$$\sigma_k = \sigma_\theta \frac{S}{r_{\text{вн}}}; \quad (4)$$

$S$  – толщина полосы.

Следует отметить, что в работе [6] рассмотрен случай нахождения нейтральной поверхности в пределах изгибаемой полосы, т.е.  $\sigma_\theta \leq \sigma_T$ .

Однако при изгибе с растяжением возможен случай, когда растягивающие тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$  могут привести к растяжению всех слоев изгибаемой полосы, тогда нейтральная по-

верхность (т.е. поверхность, на которой приращение деформаций равно нулю) будет располагаться ниже ее внутренней поверхности.

Иными словами, при  $\sigma_\theta > \sigma_T$  радиус нейтральной поверхности будет меньше внутреннего радиуса  $r_{вн}$ , т.е. эта поверхность выходит за пределы полосы.

## 2. Анализ результатов исследования

Для решения поставленной задачи предлагается способ нахождения нейтральной поверхности, согласно которому полосу, подвергающуюся изгибу с растяжением, следует рассматривать только как часть полосы при чистом изгибе, т.е. при действии одних изгибающих моментов. В этом случае предлагается также использовать формулу (2).

Для иллюстрации данного утверждения снова обратимся к теории чистого изгиба.

Приравняем радиальные напряжения (1) к контактному (4), действующим на поверхность произвольной толщины. Тогда тангенциальные напряжения, действующие на внутреннюю поверхность полосы при изгибе с растяжением, равны

$$\sigma_\theta = \frac{r_{вн}}{S} \sigma_k = \frac{r_{вн}}{S} \sigma_T \ln \frac{r_i}{r_{вн}}. \quad (4a)$$

Таким образом, задаваясь изменением контактных напряжений, действующих от внутренней поверхности к центру кривизны, появляется возможность определения внутреннего радиуса полосы, изгибаемой с растяжением.

Например, задаваясь изменением контактных напряжений в виде функций (1), радиус внутренней поверхности полосы равен

$$r_{вн} = \frac{r_{нар}}{\exp\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_T} \frac{S}{r_i}\right)} = \frac{r_{нар}}{\exp(\sigma_k/\sigma_T)}.$$

При допущении отсутствия контактных (радиальных) напряжений на внутренней поверхности полосы ( $\sigma_k = 0$ ), т.е. при отсутствии растяжения заготовки, искомый радиус нейтральной поверхности совпадает с формулой (2):

$$\rho_n = \sqrt{\frac{r_{нар} r_{вн}}{\exp(\sigma_k/\sigma_T)}} = \sqrt{r_{нар} r_{вн}}.$$

При допущении плоского напряженного состояния проведем численное моделирование процесса изгиба с растяжением широкой полосы единичной толщины ( $S = 1,0$  мм). Минимальный радиус изгиба металла принимается  $r_{вн} = 2S = 2,0$  мм. Учитывая, что  $r_{нар} = r_{вн} + S = 2,0 + 1,0 = 3,0$  мм, устанавливается радиус нейтральной поверхности при чистом изгибе:

$$\rho_n = \sqrt{r_{нар} r_{вн}} = \sqrt{3,0 \cdot 2,0} = 2,45 \text{ мм}.$$

Относительная величина смещения нейтральной поверхности от срединного радиуса принятой кривизны  $r_{нар}/r_{вн} = 3,0/2,0 = 1,5$

$$\frac{\rho_n}{r_{сп}} = \frac{2\rho_n}{r_{нар} + r_{вн}} = \frac{2 \cdot 2,45}{3,0 + 2,0} = 0,98.$$

Принимая модельным материалом сталь 08КП, устанавливается тангенциальное напряжение, растягивающее полосу (4a):

$$\sigma_\theta = \frac{r_{вн}}{S} \sigma_T \ln \frac{\rho_n}{r_{вн}} = \frac{2,0}{1,0} 230 \ln \frac{2,45}{2,0} = 93,4 \text{ МПа},$$

соответственно, контактное (радиальное) напряжение сжатого волокна:

$$\sigma_k = \sigma_\theta \frac{S}{r_{вн}} = 93,4 \frac{1,0}{2,0} = 46,7 \text{ МПа},$$

где  $\sigma_T = 230$  МПа – предел текучести материала в исходном (отожженном) состоянии.

В результате искомый радиус нейтральной поверхности при изгибе с растяжением (3) равен

$$\begin{aligned} \rho_n &= \sqrt{\frac{r_{нар} r_{вн}}{\exp(\sigma_k/\sigma_T)}} = \\ &= \sqrt{\frac{3,0 \cdot 2,0}{\exp(46,7/230)}} = 2,21 \text{ мм}, \end{aligned}$$

или

$$\frac{\rho_n}{r_{сп}} = 0,88.$$

Для наглядного представления о скорректированном положении нейтральной поверхности приведем полученные результаты к виду формулы Хилла – Ренне:

$$k = f(\rho_n) = \sqrt{\frac{1}{\exp(\sigma_k/\sigma_T)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\exp(46,7/230)}} = 0,903,$$

или

$$\rho_n = 0,903 \sqrt{r_{\text{нар}} r_{\text{вн}}}.$$

Таким образом, растяжение изгибаемой полосы будет смещать нейтральную поверхность ближе к внутренней поверхности. Аналогичные расчеты других параметров гибки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нейтральная поверхность полосы  
при изгибе с растяжением ( $S = 1,0$  мм)  
[Table 1. The neutral surface of the strip  
under bending with stretching ( $S = 1,0$  mm)]

$r_{\text{вн}}, \text{мм [mm]}$	10	4,0	2,0	1,0	0,5
$r_{\text{нар}}/r_{\text{вн}}$	1,1	1,25	1,5	2,0	3,0
$\sigma_\theta, \text{МПа [MPa]}$	110	102,2	93,4	79	63,7
$\sigma_k, \text{МПа [MPa]}$	11	25,6	46,7	79	127,4
$\rho_n/r_{\text{ср}} :$ – чистый изгиб [pure bending] – изгиб с растяжением [tensile bending]					
	0,999	0,993	0,980	0,940	0,870
	0,975	0,940	0,884	0,793	0,660
$k = f(\rho_n)$	0,976	0,946	0,903	0,842	0,758

Из проведенного исследования видно, что увеличение отношения наружного и внутреннего радиусов приводит к росту контактных (радиальных) напряжений и более интенсивному смещению нейтральной поверхности, что, несомненно, повлияет на выбор первоначальных размеров заготовки (рис. 2).

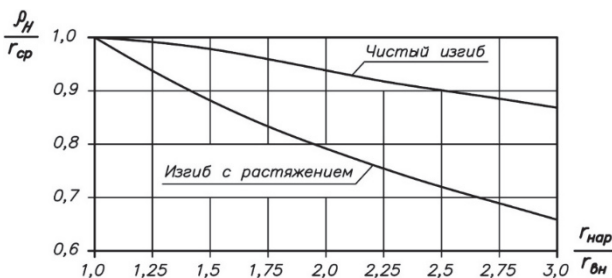


Рис. 2. Нейтральная поверхность изогнутой полосы  
[Figure 2. The neutral surface of the bent strip]

В ходе разработки конкретных технологических процессов листовой штамповки практический интерес представляет определение фактических растягивающих сил по сечению изгибаемой полосы. Например, при вытяжке существует технологический дефект – волнистость стенок детали («хлопун»), механизм образования которого связан с недостаточной величиной натяжения заготовки, для чего используются перетяжные пороги и тормозные ребра штамповой оснастки, создающие усилие торможения в процессе перетягивания через них листового материала [7–10]. При этом главным критерием качественного формообразования является вытяжка без разрушения, т.е. обеспечение такого напряженного состояния, при котором в стенках вытягиваемой заготовки не возникает растягивающих напряжений, приводящих к разрыву металла.

В соответствии с вышеизложенной теорией проведем исследование величины тангенциальных растягивающих напряжений, действующих в сечении изгибаемой полосы.

В связи с тем, что изгиб полосы на кромке формообразующего инструмента протекает с обособленным развитием деформационных процессов на каждом волокне произвольного радиуса и приводит к крайне неравномерному распределению напряжений и деформаций по толщине полосы, а следовательно, неравномерному упрочнению, моделирование проводим с учетом линейного роста предела текучести по толщине полосы от внутренних волокон к внешним. Для этого сечение полосы разделяем на  $i = 100$  волокон одинаковой толщины:

$$\Delta S = S/i = 1,0/100 = 0,01 \text{ мм.}$$

Тогда для первого волокна  $i = 1$  от радиуса внутренней поверхности полосы  $r_1 = r_{\text{вн}} + \Delta S = 2,0 + 0,01 = 2,01$  мм величина тангенциального напряжения (4а) равна

$$\sigma_\theta = \frac{r_{\text{вн}}}{S} \sigma_T \ln \frac{r_1}{r_{\text{вн}}} = \frac{2,0}{1,0} 230 \ln \frac{2,01}{2,0} = 2,3 \text{ МПа.}$$

Деформация данного волокна в тангенциальном направлении

$$\varepsilon_\theta = -\frac{r_i - r_{\text{вн}}}{r_i} = \frac{r_i}{r_{\text{вн}}} - 1,0 =$$

$$= \frac{r_1}{r_{\text{вн}}} - 1,0 = \frac{2,01}{2,0} - 1,0 = 0,005.$$

Используя эмпирическую зависимость сопротивления пластической деформации для принятой стали 08КП с учетом деформационного упрочнения, устанавливается растягивающее напряжение по ширине полосы, позволяющее создать усилие торможения при перетягивании листового материала через тормозные ребра штамповой оснастки [11]:

$$q_0 = \sigma_0 + 34,6 \varepsilon_0^{0,5} = 2,3 + 34,6 \cdot 0,005^{0,5} = 4,7 \text{ МПа.}$$

Аналогично производится расчет остальных волокон по сечению полосы, позволяя оценить допустимый уровень растягивающих напряжений в зависимости от параметров формообразования и механических свойств материала (табл. 2).

Таблица 2

Напряженное состояние в сечении полосы, изгибаемой с растяжением  
[Table 2. Stress state in the section of the strip, bent with stretching]

№ волокона, $i$ [№ fibers, $i$ ]	Радиус изгиба $r_i$ , мм [Bending radius $r_i$ , mm]	Тангенциальное напряжение $\sigma_0$ , МПа [Circumferential stress $\sigma_0$ , MPa]	Тангенциальная деформация, $\varepsilon_0$ [Circumferential deformation, $\varepsilon_0$ ]	Растягивающее напряжение $q_0$ , МПа [Tensile stress $q_0$ , MPa]
1	2,01	2,30	0,005	4,7
10	2,10	22,4	0,050	30,1
20	2,20	43,8	0,100	54,7
30	2,30	64,3	0,150	77,7
40	2,40	83,9	0,200	99,4
50	2,50	102,6	0,250	119,9
60	2,60	120,7	0,300	139,7
70	2,70	138,0	0,350	158,5
80	2,80	154,8	0,400	176,7
90	2,90	170,9	0,450	194,1
100	3,00	186,5	0,500	211,0

### Заключение

Разработан математический алгоритм пластического течения материала для процессов гибки с растяжением.

Объективность результатов достигалась разбиением сечения исходной полосы на 100 отдельных волокон одинаковой толщины (как показали расчеты, увеличение числа волокон свыше 100 не повышает точности расчетов). Принимая во внимание крайне неравномерное распределение деформаций по толщине и, следовательно, неравномерное упрочнение материала, рассчитывалось напряженное состояние каждого волокна по отдельности.

Моделирование позволило оценить конкретное усилие торможения при изгибе (спрямлении) полосы в процессе перетягивания через перетяжные пороги и тормозные ребра штамповой оснастки для устранения возможных дефектов вытягиваемых деталей [7–10].

Таким образом, проведение дополнительных теоретических исследований напряженно-деформированного состояния металла позволит более обоснованно подойти к определению силовых параметров гибки, уточнить геометрию формообразующего инструмента, а также выбрать оптимальные технологические режимы, обеспечивающие высокое качество выпускаемой продукции.

### Список литературы

1. Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 870–874.
2. Шинкин В.Н. Методика расчета геометрии стального листа при предварительной правке на семироликовой правильной машине // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 11. С. 793–798.
3. Wiebenga J.H., Atzema E.H., An Y.G., Vegter H., van den Boogaard A.H. Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming // Journal of Materials Processing Technology. February 2014. Vol. 214. Issue 2. Pp. 238–252.
4. Parsa M.H., Nasher Al Ahkami S., Pishbin H., Kazemi M. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming // Materials & Design. October 2012. Vol. 41. Pp. 326–337.
5. Ильин Л.Н., Семенов И.Е. Технология листовой штамповки. М.: Дрофа, 2009. 475 с.
6. Верхов Е.Ю., Морозов Ю.А. Анализ и разработка технологии изготовления гнутых толстолистовых деталей // Вестник Московского государственного открытого университета. Серия: Техника и технология. 2011. № 4 (6). С. 14–19.
7. Верхов Е.Ю., Морозов Ю.А., Фролов А.А. Прижим вытяжного штампа для качественного получения сложных листовых деталей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 2. С. 11–17.
8. Морозов Ю.А., Верхов Е.Ю., Крутина Е.В. Анализ влияния профилей тормозных участков вытяжных штампов на возможность получения качественных изделий сложной формы из листовых металлов // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 1. С. 19–24.
9. Pathak N., Butcher C., Worswick M. Assessment of the Critical Parameters Influencing the Edge Stretchability of Advanced High-Strength Steel Sheet // Journal of Materials Engineering and Performance. 1 November 2016. Vol. 25. Issue 11. Pp. 4919–4932.

10. Ishimaru E., Takahashi A., Ono N. Effect of material properties and forming conditions on formability of high-purity ferritic stainless steel // Nippon Steel Technical Report. September 2010. No. 99. Pp. 26–32.

11. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. Теория прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1982. 335 с.

#### Об авторах

**Морозов Юрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в машино- и приборостроении, МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА). *Область научных интересов:* исследование и разработка с математическим обеспечением эффективных процессов обработки металлов давлением. ORCID iD: 0000-

0001-9229-7398. eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426.

*Контактная информация:* e-mail – akafest@mail.ru

**Верхов Евгений Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки материалов давлением и аддитивных технологий, Московский политехнический университет (Московский Политех). *Область научных интересов:* обработка металлов давлением, формообразование деталей листовой штамповкой. ORCID iD: 0000-0002-7993-4169. eLIBRARY SPIN-код: 1244-5518. *Контактная информация:* e-mail – uv.evg.yourich@mail.ru

#### Для цитирования

Морозов Ю.А., Верхов Е.Ю. Определение ширины заготовки в условиях изгиба с растяжением штампуемой детали // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 2. С. 83–89. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-83-89.

RESEARCH PAPER

## Determining the width of the workpiece under bending conditions with stretching of the stamped part

Yury A. Morozov<sup>1\*</sup>, Evgeniy Yu. Verkhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, 20 Stromynka St., Moscow, 107996, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya St., Moscow, 111250, Russian Federation

\*akafest@mail.ru

Received: October 30, 2018

Revised: November 29, 2018

Accepted: January 16, 2019

#### Keywords:

neutral surface;  
bending radius;  
radius of curvature;  
pure bending;  
bending and stretching

#### Abstract

**Aims of research.** This paper deals with the problem of determining the radius of the neutral surface of the bending strip at the same time the action of tensile stresses.

**Methods.** In the development of technological processes of sheet bending and the calculation of the initial billet (sweep), most often considered a flat stress state and preference is given to the theory of pure bending, providing uniform curvature of the individual layers of metal under the action of the bending moment and neglecting the action of transverse tensile forces. However, in reality, bending is always accompanied by sliding of the metal along the deforming tool, causing the appearance of friction forces and creating a complex loading in the form of plastic bending with stretching in the metal, which will additionally displace the neutral surface, forcing the experienced one to adjust the technology of manufacturing bent parts. Provides an overview and analysis of the most famous works dedicated to the topic, specifying the distribution of the contact stresses from the inner surface to the center of curvature and developed the theory of complex bending, which allows to specify the radius of the neutral surface in conditions of stretching of the flexible strip of the additional tangential stresses.

**Results.** The results obtained will allow to simulate the stress state of the metal in the development of technological processes of sheet stamping and, in particular, to assess the specific braking force during the bending (straightening) of the strip in the process of pulling through the thresholds and brake edges of the die tooling to eliminate possible defects in the elongated parts and to clarify the dimensions of the workpiece and the finished profile.

#### References

1. Shinkin V.N. (2016). Raschet sil i momentov semirolikovoj pravil'noj mashiny pri predvaritel'noj pravke stal'nogo lista [Calculation of steel sheet's

curvature under preliminary flattening on the seven roller straightening machine]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]*, 59(12), 870–874. (In Russ.)

2. Shinkin V.N. (2016). Metodika rascheta geometrii stal'nogo lista pri predvaritel'noj pravke na semirolikovoj pravil'noj mashine [Calculation method of steel sheet's geometry under preliminary flattening on seven-roller straightening machine]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 59(11), 793–798. (In Russ.)
3. Wiebenga J.H., Atzema E.H., An Y.G., Vegter H., van den Boogaard A.H. (2014). Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 238–252.
4. Parsa M.H., Nasher Al Ahkami S., Pishbin H., Kazemi M. (2012). Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming. *Materials & Design*, (41), 326–337.
5. Ilyin L.N., Semenov E.I. (2009). *Tekhnologiya listovoj shtampovki [Technology of sheet metal forming]*. Moscow: Drofa Publ., 475. (In Russ.)
6. Verkhov E.Yu., Morozov Yu.A. (2011). Analysis and development of manufacturing technology for plate bent parts. *Bulletin of the Moscow State Open University. Series: Technique and Technology*, 4(6), 14–19. (In Russ.)
7. Verkhov E.Yu., Morozov Yu.A., Frolov A.A. (2015). Clamp drawing die for high-quality produce complex sheet metal parts. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (2), 11–17. (In Russ.)
8. Morozov Yu.A., Verkhov E.Yu., Krutina E.V. (2016). Receiving qualitative products at the sheet extract with the clip. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, (1), 19–24. (In Russ.)
9. Pathak N., Butcher C., Worswick M. (2016). Assessment of the Critical Parameters Influencing the Edge Stretchability of Advanced High-Strength Steel Sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(11), 4919–4932.
10. Ishimaru E., Takahashi A., Ono N. (2010). Effect of material properties and forming conditions on formability of high-purity ferritic stainless steel. *Nippon Steel Technical Report*, (99), 26–32.
11. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. et al. (1982). *Teoriya prokatki: spravochnik [Theory rolling: reference guide]*. Moscow: Metallurgiya Publ., 335. (In Russ.)

#### About the authors

**Yury A. Morozov** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information Technologies in Machine- and Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA). *Research interests*: research and development with mathematical support of effective processes of metalworking with pressure. ORCID iD: 0000-0001-9229-7398. eLIBRARY SPIN-code: 3189-5426. *Contacts*: e-mail – akafest@mail.ru

**Evgeniy Yu. Verkhov** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Pressure Processing and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University. *Research interests*: metal forming, shaping of parts by sheet stamping. ORCID iD: 0000-0002-7993-4169. eLIBRARY SPIN-code: 1244-5518. *Contacts*: e-mail – uv.evg.yourich@mail.ru

#### For citation

Morozov Yu.A., Verkhov E.Yu. (2019). Determining the width of the workpiece under bending conditions with stretching of the stamped part. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(2), 83–89. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-83-89