

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.9.01:539.3

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННОЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СЕРПОВИДНОСТЬ УГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕНТЫ

Конев С.В.¹, Миянов А.Г.², Файнштейн А.С.¹, Харченко М.В.¹

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²Уральская металлообрабатывающая компания, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи. В процессе изготовления высокопрочной упаковочной ленты может быть получен дефект «серповидная лента». Известно, что дефект серповидности обусловлен различием в натяжении параллельно идущих полос ленты в выполняемых технологических операциях. **Используемые методы.** На участках между валковым натяжителем и печью (до термообработки) и после ванны водяного охлаждения (после термообработки) производственной линии ООО «Уральская металлообрабатывающая компания» проведены замеры величины серповидности ленты, выявившие повышенную величину дефекта. Статистическим анализом величины дефекта, при большой (≥ 100) выборке замеров серповидности ленты двух типоразмеров, подтверждено, что дополнительной причиной возникновения серповидной ленты является термическая обработка ленты путем патентования в свинцовой ванне. Предположено, что механизмом образования серповидности при термообработке ленты является внеосевое упруго-пластическое растяжение ленты. Внеосевое растяжение обозначается при действии на кромки ленты сил трения при взаимодействии кромок ленты со стенками направляющего ролика, погруженного в свинцовую ванну. В результате появляется дополнительный силовой фактор – изгибающий момент. Анализом напряженно-деформированного состояния ленты при внеосевом растяжении определена схема силовых параметров, влияющие на серповидность ленты при термообработке. Рассчитано напряженно-деформированное состояние ленты в упругой зоне, что позволило установить границы зон пластической деформации. Выявлены зависимости критической кривизны ленты от нескольких параметров – ширины и толщины ленты, натяжения и температуры ленты. Установлены критерии, определяющие начало пластической деформации по кромкам ленты. Установлено, что при увеличении натяжения кривизна ленты может быть уменьшена на 13–30%. **Результаты.** Статистическим анализом установлено влияние на серповидность ленты операции патентования. Определена схема силовых параметров и рассчитано напряженно-деформированное состояние ленты. Определены критерии, определяющие начало пластической деформации и показана возможность существенного снижения кривизны.

Ключевые слова: высокуглеродистая лента, серповидность, кривизна, упругие и пластические зоны деформации, трение на кромках ленты.

Введение

В процессе изготовления высокопрочной упаковочной ленты (ВУЛ) шириной 12–32 мм и толщиной 0,5–1,0 мм на технологической линии предприятия ООО «Уральская металлообрабатывающая компания» (рис. 1–2) наблюдается появление дефекта «серповидность».

По ТУ 24.32.10-011-94835001-2017 и EN 13246:2001 серповидность ленты должна составлять не более 10 мм на 2 м длины. По ASTM D3959–15 серповидность ленты не должна превышать 12 мм на любом участке длиной 2,4 м.

Считается [1,2], что появление серповидности

обусловлено тем, что разрезаемая исходная рулонная лента имеет некоторую разнотолщинность по ширине, в результате чего отличается длина порезанных наматываемых полос. Это приводит к различию в натяжении параллельно идущих полос ленты в последующих технологических операциях.

Разница в натяжении смежных полос ленты при резке приводит к подвижности менее натянутых полос, трению кромок ленты о направляющие и, как следствие, искривлению ленты. Для предотвращения серповидности ленты на этом этапе установлен валковый натяжитель, состоящий из 16 разделенных роликов с отдельными нажимными роликами.



Рис. 1. Технология изготовления ВУЛ

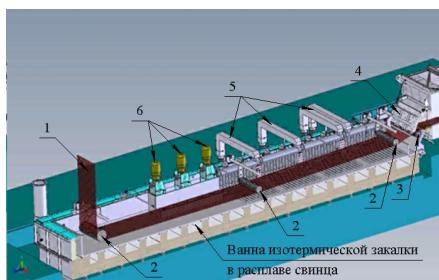


Рис. 2. Часть линии изготовления ВУЛ:
 1 – лента; 2 – погруженные опорные ролики, направляющие ленту в расплаве свинца;
 3 – отклоняющий ролик между печью и ванной изотермической закалки; 4 – заслонка кожуха между печью и ванной изотермической закалки; 5 – система воздушного охлаждения свинца; 6 – погружные насосы для перемешивания расплава свинца

В упомянутых источниках также отмечается, что, помимо разнотолщины заготовки, дополнительными факторами, влияющими на появление дефекта «серповидность ленты», является состояние и настройка инструмента продольной резки исходной рулонной ленты. Вместе с тем авторами отмечено появление новых очагов серповидности, а также увеличение серповидности ленты после ее термической обработки (ванна изотермической закалки в расплаве свинца и погружной ролик, направляющий ленту, показаны на **рис. 3**). Поскольку увеличенная серповидность может привести к замечаниям потребителей, необходимо проанализировать и изучить процесс деформирования ленты при ее термообработке.

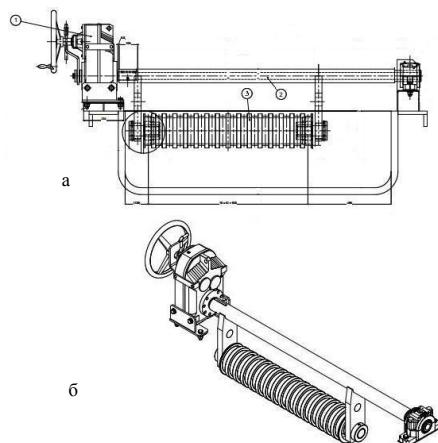


Рис. 3. Ванна изотермической выдержки (а) и направляющий ролик (б): 1 – механизм управления роликом; 2 – несущая ось; 3 – ролик

Основная часть

Авторами произведен статистический анализ величины дефекта или его усиления в процессе термической обработки по методике [3–7]. Была проведена большая (≥ 100) выборка замеров серповидности ленты двух типоразмеров по ГОСТ 26877. Для измерения серповидности на ленте намечали участки длиной 2 м. Серповидность ленты определяли как наибольшее отклонение между поверхностью кромки ленты и приложенной прецизионно плоской поверхности без скруток и перегибов. Замеры отклонения (зазора)

производили щупами без удаления отмеченного участка ленты в процессе остановок линии на участках между валковым натяжителем 1 и печью (до термообработки) и после ванны водяного охлаждения 1 (после термообработки).

Определено, что при уровне значимости 0,05 данные наблюдения не противоречат гипотезе о нормальном распределении приращений серповидности. Были построены гистограммы частот (рис. 4). Как видно из гистограмм, налицо появление и усиление дефекта. Максимально частое усиление дефекта составляло 0,8–1,1 и 0,9–1,5 мм (для лент с сечением $15,9 \times 0,5$ и $19,1 \times 0,5$ мм соответственно), что могло в совокупности с ранее полученной серповидностью привести (и приводило) к превышению допустимых по ТУ или договору с потребителем значений.

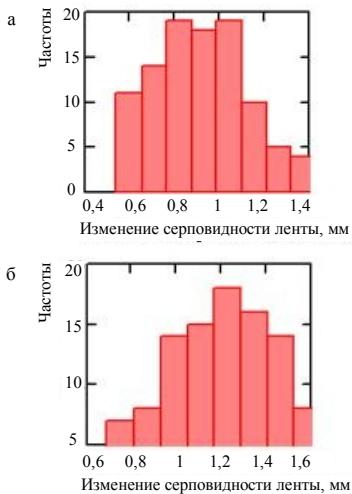


Рис. 4. Гистограммы изменений серповидности ленты: сечением $15,9 \times 0,5$ мм (а); сечением $19,1 \times 0,5$ мм (б)

Полученные опытные данные выявили необходимость анализа напряженно-деформированного состояния ленты. Схема граничных условий нагружения ленты, как равномерно движущегося призматического стержня, представлена на рис. 5.

На рис. 5,а представлена технологическая схема правильного движения стержня. На рис. 5,б показано появление сил трения f ленты о боковые грани калибра погружного направляющего ролика (см. рис. 3), вызванное, в том числе, невиди-

мыми оператору наростами, образующимися за счет свинца и тетраоксида трисвинца [8] в ванне изотермической закалки.

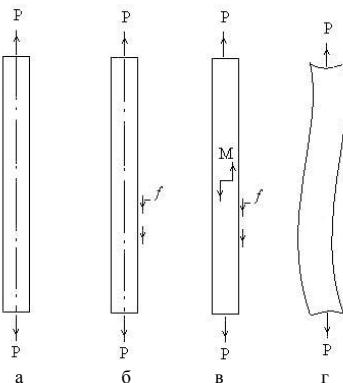


Рис. 5. Схемы нагружения ленты как стержня:
а – осевое нагружение; б – нагружение с трением по кромке; в – уравновешенная схема;
г – схема деформации ленты

Поскольку схема по рис. 5,б не уравновешена, то, исходя из условия равновесия ленты, к ней необходимо добавить уравновешивающий момент M (рис. 5,в). Этот дополнительный момент образуется внутренними усилиями в ленте. Такой случай нагружения твердого тела, сочетающий напряжения осевой и изгибной деформаций, называется внецентренным нагружением [9–12]. Изгибающий момент, действующий в плоскости ленты, приводит к появлению серповидности (рис. 5,г).

При расчете стержня на внецентрное упругое сжатие определяют предельно допускаемые нагрузки, исключающие поломку стержня от совместного действия осевых и изгибных деформаций, а также положение ядра поперечного сечения. На внецентрное растяжение стержни, как правило, не рассчитываются, поскольку в подавляющем большинстве случаев они являются элементами строительных конструкций, подвергаемых сжатию вплоть до потери устойчивости. При обработке металлов давлением можно отметить случаи продольного сжатия стержневой части формируемого изделия, находящегося в пластическом состоянии, например, при прокатке или волочении с подпором [13,14].

При внецентренном растяжении ленты пластическая деформация, в первую очередь, затро-

нет части поперечного сечения в точках вблизи кромок ленты [15, 16].

Для численного анализа образующегося дефекта рассмотрим схему нагружения ленты с размерами поперечного сечения $b \times h$ (b – ширина ленты, h – толщина ленты) силами, приложенными к ленте, как на **рис. 6**. В поперечных сечениях ленты будет действовать изгибающий момент M , определяемый из условия равновесия ленты:

$$M = \frac{fNb}{2}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения трущихся поверхностей ленты и покрытого отложениями свинца ручья направляющего ролика, по некоторым данным, имеющий значение до 0,43 [17]; N – сила прижима ленты к поверхности ручья ролика (сила N определяется по натяжению P , создаваемому намоточным устройством и расстоянию между осью намоточного устройства и осью погруженного ролика).

Напряжения в крайних волокнах ленты от изгибающего момента будут равны

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{12M}{hb^3}, \quad (2)$$

где W – момент сопротивления сечения ленты.

Как отмечалось выше, эти напряжения в растянутой зоне ленты суммируются с напряжениями от натяжения P . Чтобы материал ленты оставался в зоне упругих деформаций, суммарное напряжение не должно превышать предела текучести σ_T материала ленты:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{12M}{hb^3} + \frac{P}{bh} \leq \sigma_T. \quad (3)$$

Найдем расстояние e (см. **рис. 6**) от края ленты, вдоль которого действует сила трения $F_{tr} = fN$, до линии, параллельной оси ленты, вдоль которой суммарное напряжение будет равно нулю (до нейтрального слоя ленты). Это расстояние равно [18] половине ширины ленты плюс отрезок

$e_0 = \frac{2i^2}{M}$, то есть

$$e = \frac{b}{2} + \frac{2i^2}{M}, \quad (4)$$

где i – радиус инерции сечения ленты, $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ (I – момент инерции сечения ленты, A – площадь поперечного сечения ленты).

По мере роста деформаций, появляющееся в крайних волокнах пластическое состояние охватывает все большее количество материала. Граница между упругой и пластической зонами постепенно приближается к нейтральному слою, который меняет свое положение.

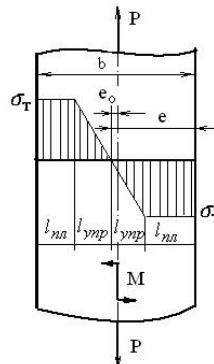


Рис. 6. Упругие и пластические зоны деформации ленты

Определим теперь геометрические характеристики изогнутой ленты (критическую кривизну ленты, величину стрелы изгиба), которые при рассматриваемой схеме деформации приведут к пластической деформации кромок.

Радиус кривизны найдем из выражения

$$\sigma_{\max} = E\epsilon_{\max} + \frac{P}{bh} = E \frac{y_{\max}}{\rho} + \frac{P}{bh} = E \frac{b}{2\rho} + \frac{P}{bh} + \sigma_T,$$

получив

$$\rho = \frac{Eb}{2(\sigma_T - \frac{P}{bh})}. \quad (5)$$

Для определения предельной стрелы изгиба ленты (локальной серповидности ленты на длине l , в общем случае не совпадающей с базовой длиной для замера серповидности) воспользуемся стандартными таблицами [19], считая, что оба края изогнутого участка ленты жестко заделаны в саму ленту:

$$f_{\max} = \frac{Ml^2}{216EI}, \quad (6)$$

где l – длина изогнутого участка ленты; E – модуль упругости стали; $I = \frac{hb^3}{12}$ – момент инерции сечения ленты при изгибе в плоскости ленты.

Графики зависимости критической кривизны ленты $1/\rho$ от ряда параметров – ширины ленты, тянувшего усилия, действующего на ленту, температуры ленты в свинцовой ванне, определяемой скоростью прохождения ленты через ванну (в зависимости от сортамента ленты, составляющей 20–35 м/мин), показаны на **рис. 7–8**. При построении графиков использованы данные по пластичности углеродистой стали, приведенные в [20].

Как видно из графиков, тянувшее усилие препятствует образованию кривизны ленты. Так, из **рис. 7** видно, что увеличение тянущего усилия с 0,5 до 2,5 кН снижает кривизну ленты толщиной 1 мм с 0,65 до 0,45 м⁻¹, при ширине ленты 10 мм, и от 0,23 до 0,20 м⁻¹ при ширине ленты 30 мм. При более высоких температурах термообработки (см. **рис. 8**) снижение кривизны еще более выражено. Таким образом, кривизна ленты может быть снижена на 13–30% повышением тянущего усилия при приемлемых температурных режимах патентирования. Полученные результаты подтверждаются публикацией [21].

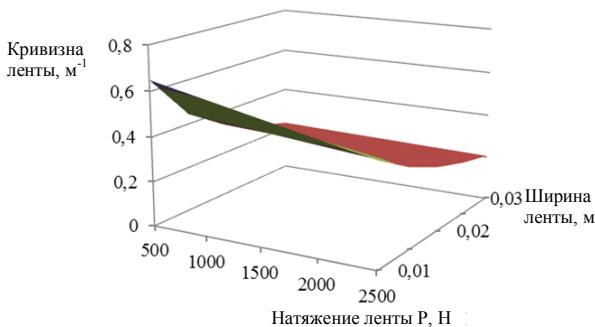


Рис. 7. Зависимость кривизны ленты от ее ширины и тянущего усилия при толщине ленты 1 мм (при температуре ленты 400°C)

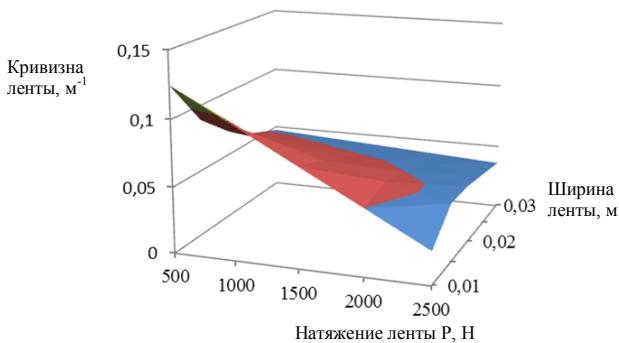


Рис. 8. Зависимость кривизны ленты от ее ширины и тянущего усилия при толщине ленты 0,5 мм (при температуре ленты 440°C)

Выводы:

1. Статистическим анализом установлено влияние на серповидность углеродистой ленты операции патентирования высокоуглеродистой ленты с использованием ванны изотермической закалки с расплавом свинца.

2. Определена схема силовых параметров, влияющих на серповидность ленты при термообработке и рассчитано напряженно-деформированное состояние ленты в упругой зоне, что позволило установить границы зон пластической деформации.

3. Определены критерии начала пластической деформации по кромкам ленты. Установлено, что увеличением натяжения можно уменьшить кривизну ленты на 13–30%.

Список литературы

- Кунцын Г.А. Повышение точности процесса холодной прокатки ленты из подката клиновидного поперечного сечения: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2000. 130 с.
- Максимов Е.А. Взаимосвязь критерии и частные показатели плоскости и серповидности листового проката // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №6 С. 6–10.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Выш. школа, 2003. 480 с.
- Кацман А.Ю. Статистическая обработка экспериментальных данных. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 38 с.
- Grinstead C.M., Snell J.L. Introduction to Probability. Dartmouth College, 2016. 520 р.
- Evans M.J., Rosenthal J.S. Probability and Statistics. University of Toronto, 2015. 773 р.
- Pishro-Nik H. Introduction to probability, statistics and random processes. Kappa Research, 2014. 654 р.
- <http://www.xumuk.ru/encyclopedia/2/3982.html>
- Беляев Н.М. Сопротивление материалов: учеб. пособие. 15 изд., перераб. М.: Альянс, 2014. 607 с.
- Тимошенко С.П., Гудбер Дж. Теория упругости / под ред. Г.С. Шапиро. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.
- Love A.E. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Cambridge University Press, 2016. 350 р.
- Gould P.L., Feng Y. Introduction to Linear Elasticity. Springer, 2019. 384 р.
- Харитонов В.А., Таранин И.В. Сравнительный анализ эффективности совмещенных способов обработки металлов давлением при производстве проволоки // Сталь. 2015. №1. С. 61–64.
- Довженко Н.Н., Довженко И.Н., Сидельников С.Б. Энергосиловые параметры процесса совмещенной прокатки-пресования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №4. С. 54–61.
- Гастев В. А. Краткий курс сопротивления материалов. М.: Наука, 1977. 456 с.
- Анализ особенностей напряженного состояния фланца намоточного устройства как кольцевой пластины / Конев С.В., Михайлек В.Ф., Тефтельев И.Е., Файнштейн А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 98–102.
- <http://tehtab.ru/guide/guidephysics/frictiontovariou spairs/>
- Терегулов И.Г. Сопротивление материалов и основы теории упругости и пластичности. М.: Выш. шк., 1984. 472 с.
- <http://doctorlom.com/item230.html>
- Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. 3 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
- Пат. №2463122 РФ, МПК B21D 1/02. Способ правки полосы: заявл. 16.12.2010; опубл. 10.10.2012 / Гринавцев В.Н., Гринавцев О.В.

Поступила 06.09.19
Принята в печать 08.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>

ANALYSIS OF THE EFFECT OF OFF-CENTER ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION ON THE CARBON STRAP CAMBER

Sergey V. Konev – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Andrei G. Miyanov – Engineer
LLC Ural Metalworking Company, Magnitogorsk, Russia

Aleksandr S. Fainshtein – PhD (Phys. and Math.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: swetlana@mgn.ru

Maksim V. Kharchenko – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kharchenko.mv@bk.ru

Abstract. Problem Statement. When manufacturing high-strength steel strap on the production line of LLC Ural Metalworking Company, the strap camber defect may occur. It is known that the camber defect is caused by a difference in the tension of parallel strips of the strap

in the performed technological operations. **Methods Applied.** In the areas between the roller tensioner and the furnace (before heat treatment) and after the water cooling bath (after heat treatment) on the production line of LLC Ural Metalworking Company, the strap camber val-

ue was measured, revealing an increased value of the defect. The statistical analysis of the defect value, with a large (>100) sample of measurements of crescent tape of two sizes, confirmed that an additional cause of the defect values, at high (>100) sampling of measured straps of two types and sizes, proved that an additional reason for strap camber was heat treatment by patenting in a lead bath. It is assumed that the camber is formed during the heat treatment as a result of the off-axis elastic-plastic strain of the strap. Off-axis strain is formed by friction forces acting on the strap edges, when the strap edges interact with the walls of the guide gauge roller immersed in the lead bath. As a result, there is an additional force factor - bending moment. The analysis of the stress-strain state of the strap at off-axis strain determines the scheme of force parameters affecting the strap camber during heat treatment. The stress-strain state of the strap in the elastic zone was calculated, which allowed us to establish the boundaries of plastic deformation zones. We found the dependence between the critical strap curvature and several parameters, namely strap width and thickness, strap tension and temperature. The criteria determining the beginning of plastic deformation along the strap edges of the tape were determined. It was found that by increasing tension, the strap camber may be reduced by 13–30%.

Results. The statistical analysis established the influence of patenting operations on the strap camber. The scheme of force parameters was determined and the stress-strain state of the strap was calculated. The criteria determining the beginning of plastic deformation were determined and a possible significant decrease in camber was shown.

Keywords: high-carbon strap, camber, curvature, elastic and plastic deformation zones, friction on the strap edges.

References

1. Kunitsyn G.A. *Povyshenie tochnosti protsessa kholodnoy prokatki lenty iz podkata klinovidnogo poperechnogo secheniya. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the accuracy of the cold rolling process of narrow strips from semi-finished products with a wedge-shaped cross section. PhD thesis]. Magnitogorsk, 2000. 130 p.
2. Maksimov E.A. Relationship of criteria and partial indicators of flatness and camber of the rolled sheet. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 2012, no. 6, pp. 6–10. (In Russ.)
3. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Higher school, 2003, 480 p. (In Russ.)
4. Katsman A.Yu. *Statisticheskaya obrabotka eksperimental-*nykh dannyykh [Statistical processing of experimental data]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2008, 38 p. (In Russ.)
5. Grinstead C.M., Snell J.L. *Introduction to probability*. Dartmouth College, 2016, 520 p.
6. Evans M.J., Rosenthal J.S. *Probability and statistics*. University of Toronto, 2015, 773 p.
7. Pishro-Nik H. *Introduction to probability, statistics and random processes*. Kappa Research, 2014, 654 p.
8. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3982.html>
9. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov: ucheb. posobie* [Strength of materials: teaching aid]. 15th ed., revised. Moscow: Alliance, 2014, 607 p. (In Russ.)
10. Timoshenko S.P., Gudier J. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Edited by G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Science, 1979, 560 p. (In Russ.)
11. Love A.E. *A Treatise on the mathematical theory of elasticity*. Cambridge University Press, 2016, 350 p.
12. Gould P.L., Feng Y. *Introduction to linear elasticity*. Springer, 2019, 384 p.
13. Kharitonov V.A., Tararin I.V. A comparative analysis of the efficiency of combined methods of metal forming in wire manufacturing. *Stal [Steel]*, 2015, no. 1, pp. 61–64. (In Russ.)
14. Dovzhenko N.N., Dovzhenko I.N., Sidelnikov S.B. Power parameters of the combined rolling-press forming process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2005, no. 4, pp. 54–61. (In Russ.)
15. Gastei V.A. *Kratkiy kurs sопrotivleniya materialov* [Brief course on strength of materials]. Moscow: Science, 1977, 456 p. (In Russ.)
16. Konev S.V., Mikhailets V.F., Teftelev I.E., Fainshtein A.S. Analysis of the features of the stress state of a coiler flange as an annular plate. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 98–102. (In Russ.)
17. <http://tehtab.ru/guide/guidephysics/frictiontovarioulospairs/>
18. Teregulov I.G. *Soprotivlenie materialov i osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Resistance of materials and fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow: Higher school, 1984, 472 p. (In Russ.)
19. <http://doctorlom.com/item230.html>
20. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. 3rd ed., revised and supplemented. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 424 p. (In Russ.)
21. Grinavtsev V.N., Grinavtsev O.V. *Sposob pravki polosy* [Method of strip leveling]. Patent RF. IPC B21D 1/02 No. 2463122. Applied: 16.12.2010. Published: 10.10.2012. Bulletin No. 31.

Received 06/09/19
Accepted 08/10/19

Образец для цитирования

Анализ влияния внецентренной упруго-пластической деформации на серповидность углеродистой ленты / Конев С.В., Милюков А.Г., Файнштейн А.С., Харченко М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 18–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>

For citation

Konev S.V., Miyanov A.G., Fainshtein A.S., Kharchenko M.V. Analysis of the Effect of Off-Center Elastic-Plastic Deformation on the Carbon Strap Camber. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 18–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>