

УДК 669.2:539.374

DOI 10.18698/0536-1044-2017-6-28-34

Моделирование и расчет остаточных напряжений в прокатных профилях

С.И. Каратушин, Д.А. Храмова, Н.А. Бильдюк

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1

Modeling and Calculating Residual Stresses in Rolled Profiles

S.I. Karatushin, D.A. Khramova, N.A. Bilyduk

Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1

@ e-mail: karatsi@bk.ru, kxdaria@mail.ru

i Рассмотрены два метода определения остаточных напряжений, возникающих в прокатных профилях (тавре и швеллере): аналитический расчет с использованием MathCAD и компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS. Профили деформировали по схеме чистого изгиба таким образом, чтобы в части сечения реализовывалась пластическая деформация, т. е. в целом упругопластическая. Механические свойства задавали приближенно к реальным. Принцип моделирования остаточных напряжений — деформационный, основанный на неоднородности пластической деформации. Результаты расчетов остаточных напряжений двумя методами показали хорошую сходимость. В деформированных профилях моделировался процесс правки по компьютерной программе. При правке в механические свойства вводилась поправка на эффект Баушингера и задавался режим повторного нагружения с последующим определением остаточных напряжений и значения распределения суммарной пластической деформации. Компьютерное моделирование показало значительно большую информативность и производительность.

Ключевые слова: ANSYS, аналитический расчет, остаточные напряжения, прокатные профили, правка.

i Two methods for calculating residual stresses (RS) appearing in rolled profiles (T-beam and channel) are considered, that is the analytical calculation using MathCAD, and computer simulation based on the ANSYS software package. Profiles are formed according to the pure bending scheme in such a way that plastic deformation occurs in a part of the section, i.e. the deformation is elastoplastic in general. Mechanical properties are set close to real ones. The deformation principle used for RS modeling is based on the non-uniformity of plastic deformation. The results of the RS calculations performed by the two methods showed good convergence. A computer-aided correction process was simulated in the formed profiles. When performing the simulation, a correction for the Bauschinger effect was incorporated into the mechanical properties and a repeated loading mode was introduced, followed by the determination of RS and the value of the total plastic deformation distribution. Computer modeling proved to be significantly more informative and efficient.

Keywords: ANSYS, analytical calculation, residual stresses, rolled profiles, corrections.

Производство прокатных профилей неминуемо сопровождается искривлением изделий вдоль оси прокатки [1], что приводит к необходимости правки. Деформации после этих операций вызывают появление остаточных напряжений (ОН).

Поскольку подавляющее большинство профилей изготавливают из малоуглеродистых сталей (Ст3, Ст3пс, 08Г2 и т. п.), не упрочняющихся термической обработкой, основной причиной образования ОН является неоднородность пластической деформации в прокате [2, 3]. Значение ОН в первую очередь зависит от степени унаследованной пластической деформации и соответствующего исходного уровня прочности материала проката. Последующая правка, устраняя кривизну, вносит свои ОН, вследствие чего возникает новое уравновешенное в объеме напряженно-деформированное состояние (НДС). Поле ОН изменяется при механической обработке [4], что приводит к вторичному короблению. Значение ОН может достигать 10...30 % исходного уровня прочности. Существование ОН всегда связано с малыми пластическими деформациями, в том числе и с критическими, а это может привести к собирательной рекристаллизации в сварных швах и, соответственно, к снижению прочности и пластичности околошовной зоны [5].

Наличие неучтенных ОН существенно уменьшает точность прочностных расчетов, поэтому все виды ОН постоянно изучают и разрабатывают приборы для их определения [6, 7].

Цель работы — расчет и моделирование ОН на различных стадиях технологического процесса с помощью программного комплекса ANSYS.

Для исследования выбраны два профиля: тавр и швеллер, изгибаемые по схеме чистого изгиба.

Расчет ОН, возникающих при изгибе, с учетом линейного упрочнения для балки с сечением типа тавр. На рис. 1 показано распределение областей упругой и упругопластической деформаций по сечению тавра, где e_1 — расстояние до нейтральной оси; d — расстояние от нейтральной оси до точки, соответствующей пределу текучести.

Исходными данными являлись следующие параметры тавра № 50: его высота $h = 50 \cdot 10^{-3}$ м; толщина полки $t = 6 \cdot 10^{-3}$ м; толщина стенки

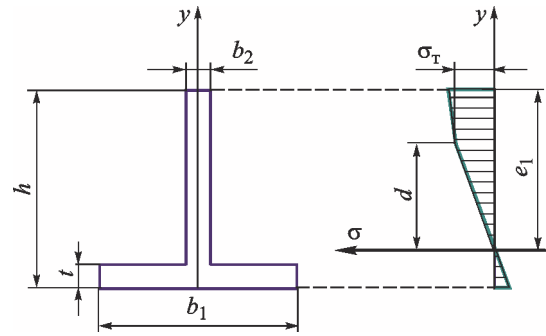


Рис. 1. Распределение областей упругой и упругопластической деформаций по сечению тавра

$b_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ м; ширина полки $b_1 = 50 \cdot 10^{-3}$ м; изгибающий момент $M_z = 3\,000$ Н·м; предел текучести $\sigma_T = 300$ МПа; коэффициент упрочнения $\Pi = 10\,000$ МПа; момент инерции $I = 12 \cdot 10^{-8}$ м⁴.

Параметры d и e_1 определялись из условия равновесия:

$$\begin{cases} \int_F \sigma(y) y dF = M; \\ \int_F \sigma(y) dF = 0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \int_{-(h-e_1)}^{t-(h-e_1)} y \frac{\sigma_T}{d} y b_1 dy + \int_{t-(h-e_1)}^d y \frac{\sigma_T}{d} y b_2 dy + \\ + \int_d^{e_1} [\Pi(y-d) + \sigma_T] y b_2 dy = M; \\ \int_{-(h-e_1)}^{t-(h-e_1)} y \frac{\sigma_T}{d} b_1 dy + \int_{t-(h-e_1)}^d y \frac{\sigma_T}{d} b_2 dy + \\ + \int_d^{e_1} [\Pi(y-d) + \sigma_T] b_2 dy = 0, \end{cases}$$

где σ — напряжение; F — сила; M — изгибающий момент.

При решении системы уравнений с помощью программы MathCAD получены искомые параметры:

$$d = 7,482 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad e_1 = 0,039 \text{ м}.$$

Далее строились графики по следующим зависимостям:

- для нормальных напряжений при упругой деформации

$$\sigma_{\text{упр}} = \frac{yM}{I};$$

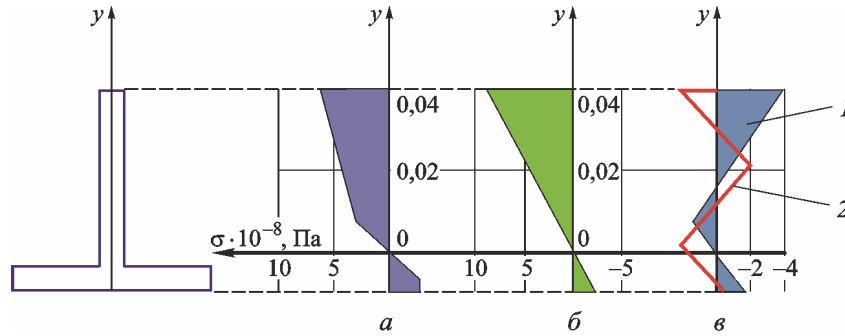


Рис. 2. Распределение в сечении тавра нормальных напряжений после упругопластического (а), упругого (б) изгибов и ОН (в) после изгиба (1) и выпрямления (2)

• для нормальных напряжений при упругопластической деформации

$$\sigma(y) = \begin{cases} \frac{\sigma_T}{d} y & \text{при } -(h - e_1) \leq y \leq d; \\ \Pi(y - d) + \sigma_T & \text{при } y > d; \end{cases}$$

• для ОН при упругопластической деформации

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma(y) - \sigma_{\text{упр}}.$$

Эпюры продольных напряжений приведены на рис. 2.

Расчет ОН, возникающих при изгибе, с учетом линейного упрочнения для балки с сечением типа швеллер. На рис. 3 представлено распределение областей упругой и упругопластической деформаций по сечению швеллера.

Исходными данными являлись следующие параметры швеллера 8 П: его высота $h = 80 \cdot 10^{-3}$ м; толщина полки $t = 7,4 \cdot 10^{-3}$ м; ширина полки $b_2 = 40 \cdot 10^{-3}$ м; толщина стенки $b_1 = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м; изгибающий момент $M_z = 7\,800$ Н·м; предел текучести $\sigma_T = 300$ МПа; коэффициент

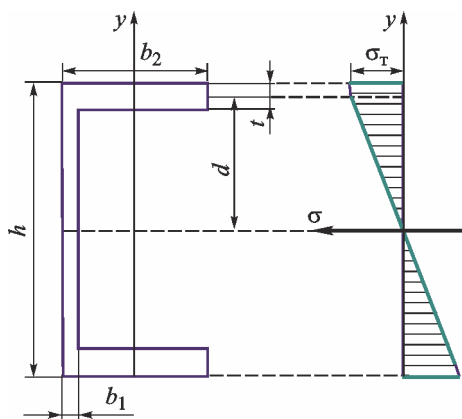


Рис. 3. Распределение областей упругой и упругопластической деформаций по сечению швеллера

упрочнения $\Pi = 6\,000$ МПа; момент инерции $I = 89,8 \cdot 10^{-8}$ м⁴.

Параметр d определялся из условия равновесия

$$\int_F \sigma(y) y dF = M,$$

или

$$\begin{aligned} & \int_{-h/2}^d [\Pi(d+y) - \sigma_T] y b_2 dy + \int_{-d}^{-h/2} \frac{\sigma_T}{d} y^2 b_2 dy + \\ & + \int_{-d}^d \frac{\sigma_T}{d} y^2 b_1 dy + \int_d^{h/2-t} \frac{\sigma_T}{d} y^2 b_2 dy + \\ & + \int_{h/2-t}^{h/2} [\Pi(y-d) + \sigma_T] y b_2 dy = M. \end{aligned}$$

При решении уравнения с помощью программы MathCAD получено значение искомого параметра:

$$d = 33 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Далее строились графики по следующим зависимостям:

• для нормальных напряжений при упругой деформации

$$\sigma(y) = \begin{cases} \Pi(y+d) - \sigma_T & \text{при } -h/2 \leq y \leq -d; \\ \frac{\sigma_T}{d} y & \text{при } -d > y > d; \\ \Pi(y-d) + \sigma_T & \text{при } d \leq y \leq h/2; \end{cases}$$

• для нормальных напряжений при упругой деформации

$$\sigma_{\text{упр}} = \frac{yM}{I};$$

• для ОН при упругопластической деформации

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma(y) - \sigma_{\text{упр}}.$$

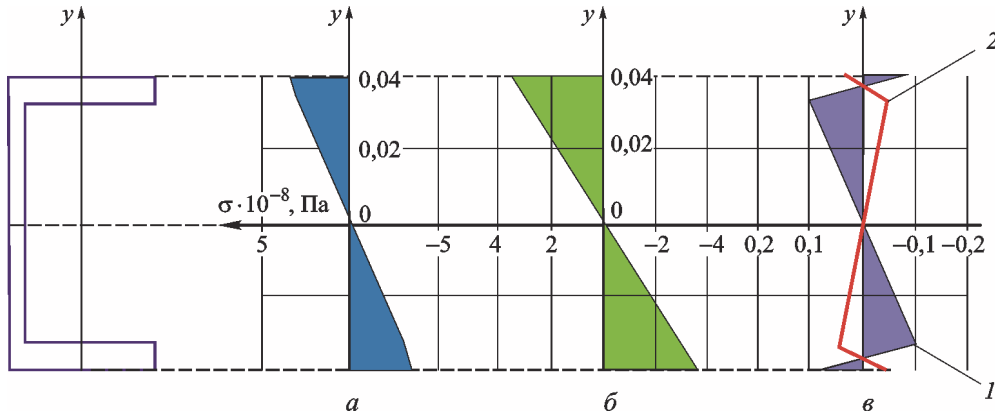


Рис. 4. Распределение в сечении тавра нормальных напряжений после упругопластического (а), упругого (б) изгибов и ОН (в) после изгиба (1) и выпрямления (2)

Эпюры продольных напряжений приведены на рис. 4.

Аналитические методы с использованием MathCAD рационально применять для сравнительно простых геометрических тел. При анализе ОН, вызванных правкой предварительно деформированных профилей, поставленную задачу значительно проще решить в программном комплексе ANSYS. При правке сказывается влияние эффекта Баушингера. Предел текучести при изгибной деформации по нашим исследованиям уменьшается примерно в 2 раза. Для моделирования процесса выпрямления прокатного профиля строится кривая деформирования выбранной стали с учетом эффекта Баушингера и коэффициента упрочнения [8], Все это, а также теорема Генки, заносится

в программу. При выпрямлении процесс нагружения профиля включает в себя три стадии (рис. 5) [9, 10].

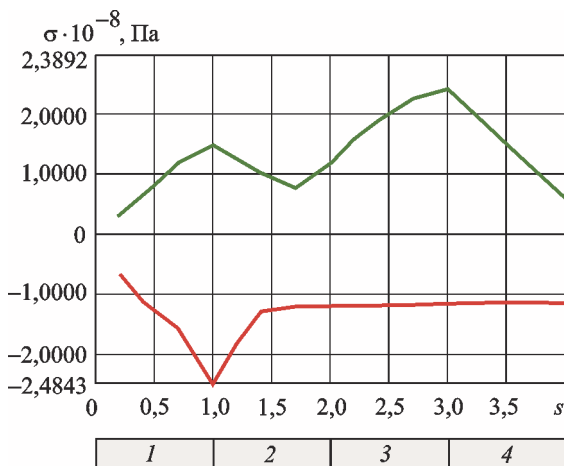
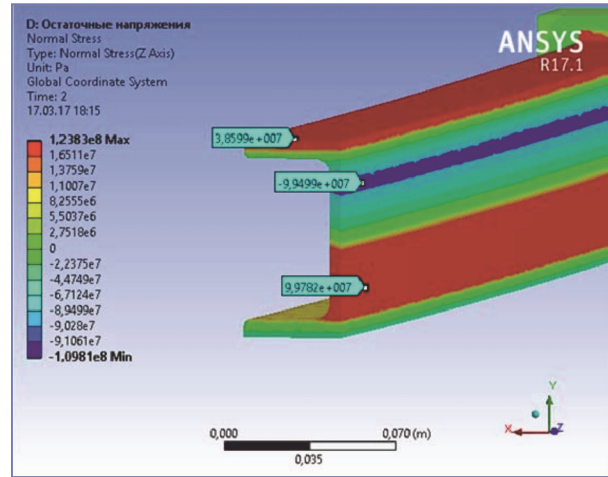
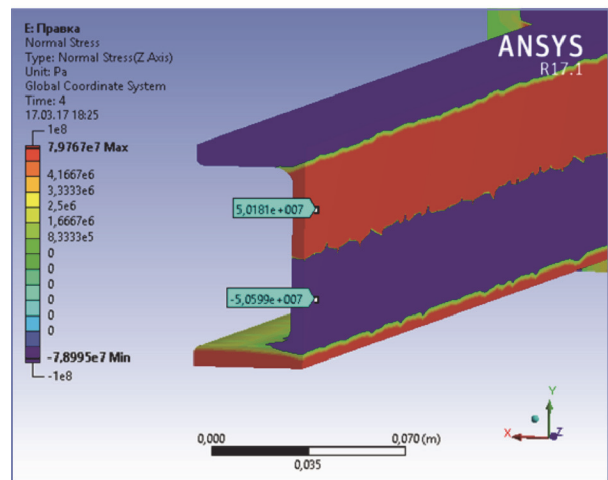


Рис. 5. Изменение нормальных напряжений в процессе изгиба (—) и выпрямления (—) прокатного профиля (тавра), полученное при расчете в среде ANSYS:

1 — упругопластический изгиб; 2 — разгрузка (снятие упругой деформации); 3 — выпрямление; 4 — разгрузка (снятие упругой деформации — пружинения); s — параметр, характеризующий стадию нагружения



а



б

Рис. 6. Распределение ОН, Па, в швеллере, полученное при расчете в среде ANSYS: а — изгиб; б — выпрямление (правка)

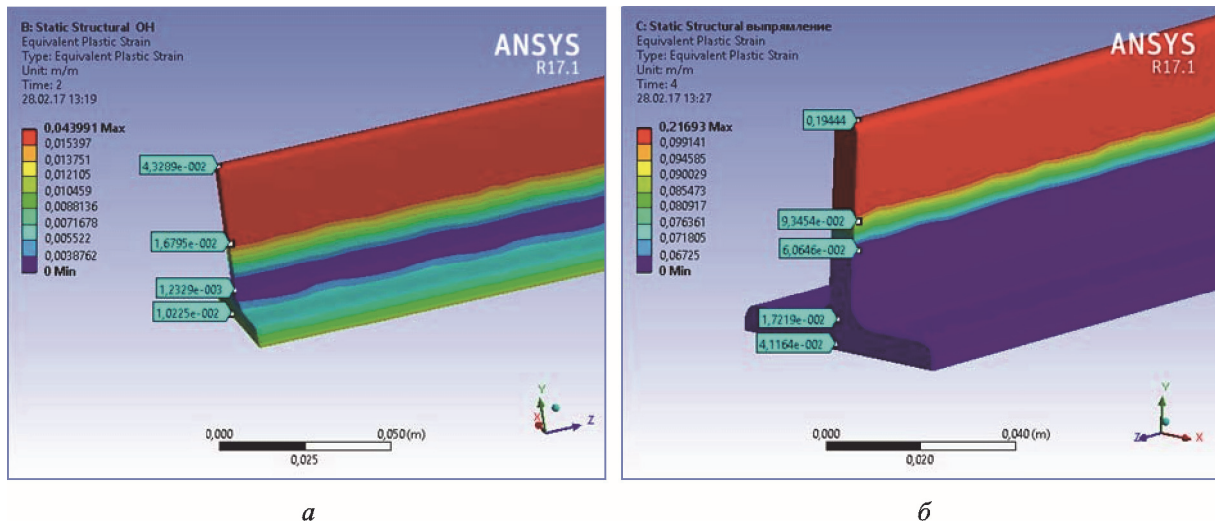


Рис. 7. Распределение зон пластических деформаций при изгибе (а) и правке (б)

Компьютерное решение позволяет получить значительно больше информации о НДС: не только его трехмерном распределении, но и о распределении упругих и пластических деформаций. Распределение нормальных продольных ОН после изгиба и выпрямления, полученное по расчетам в среде ANSYS Workbench представлено на рис. 6.

Графики напряжений по высоте сечения тавра и швеллера практически совпадают с таковыми, рассчитанными аналитически [11, 12]. Значение изгибающего момента при правке подбирается таким, чтобы свести прогиб к минимуму. Если на первом этапе изгиба момент составляет 3 000, то на третьем — 1 800 Н·м. Поскольку тавр деформируется в значительно большей степени, чем швеллер, для него и рассмотрено распределение зон пластических деформаций (рис. 7).

Минимальное значение деформации указывает положение нейтральной плоскости. При правке происходит сложение деформаций, нейтральная плоскость смещается вниз к полке. Наиболь-

шее значение пластической деформации составляет 0,19, а упругой — 0,0012. В швеллере пластически деформируется только половина толщины полки, что задано условиями.

Выводы

1. Применение MathCAD при аналитических методах расчета ОН в прокатных профилях геометрически простой конфигурации с любым упрочнением (линейным, нелинейным) делает этот метод менее трудоемким.

2. Компьютерный метод расчета ОН, например, в среде программного комплекса ANSYS (классического и Workbench), дает возможность получать больше информации о НДС, осуществлять многоступенчатые режимы нагружения и разгрузки, а также вычислять ОН по всему объему.

3. Решение рассмотренных задач с помощью программного комплекса ANSYS позволяет определять не только упругие, но и суммарные пластические деформации.

Литература

- [1] Иванов А.П., Иванова И.А. Распределение остаточных напряжений в горячекатаных прокатных профилях. *Сб. науч. тр. Украинского научно-исследовательского и проектного института стальных конструкций им. В.М. Шимановского*, 2008, вып. 2, с. 5–12.
- [2] Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. *Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий*. Пермь, Изд-во Пермского политехнического университета, 2012. 225 с.
- [3] Блурцян Р.Ш., Залазинский М.Г., Селихов Г.Ф., Блурцян И.Р. Исследование остаточных напряжений поверхностных слоев торсионных валов. *Новые материалы и тех-*

- нологии в машиностроении. Матер. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Муром, МИВГУ, 2006, № 6, с. 3–5.
- [4] Ulutan D., Erdem Alaca B., Lazoglu I. Analytical modelling of residual stresses in machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183, pp. 77–87.
- [5] Pasternak H., Launert B., Kannengießler T., Rhode M. Residual stresses and imperfections in welded high-strength I-shape sections. *6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, South Africa, 5–7 September 2016, pp. 1139–1146.
- [6] Silvestre E., De Argandoña E.S., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll leveling process. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 611–612, pp. 1753–1762.
- [7] Климова Л.Г. Управление технологическими остаточными напряжениями при охватывающем деформировании мало жестких валов. Дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2006. 189 с.
- [8] Abambres M., Quach W.-M. Residual stresses in steel members: A review of available analytical expressions. *International Journal of Structural Integrity*, 2016, vol. 7, is. 1, pp. 70–94.
- [9] Сазонов В.П., Ларионова Ю.С. Исследование влияния радиуса и глубины надреза на характер распределения остаточных напряжений в наименьшем сечении поверхностно упрочненной детали. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2012, № 5(36), с. 120–122.
- [10] Мокроусов В.И. Коэффициент пружинения при упругопластическом изгибе листа для среды с линейным упрочнением. *Молодой ученый*, 2015, № 23(103), с. 180–188.
- [11] Шинкин В.Н. Остаточные напряжения в поперечном сечении круглого бруса при изгибе. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, 2016, № 3–1, с. 145–151.
- [12] Макеев С.А., Колмаков Д.М. Моделирование остаточных напряжений в арочном тонкостенном прокате трапециевидного сечения. *Омский научный вестник*, 2014, № 1(127), с. 145–151.

References

- [1] Ivanov A.P., Ivanova I.A. Raspredelenie ostatochnykh napriazhenii v goriachekatanykh prokatnykh profiliakh [The distribution of residual stresses in hot-rolled rolling profiles]. *Sbornik nauchnykh trudov Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektnogo instituta stal'nykh konstruksii im. V.M. Shimanovskogo* [Collection of scientific works of the Ukrainian scientific-research and design Institute of steel construction named after V.M. Szymanowski]. 2008, is. 2, pp. 5–12.
- [2] Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napriazheniia i ikh vliianie na dolgovechnost', i nadezhnost' metalloizdelii* [Technological residual stresses and their influence on the durability and reliability of metal products]. Perm', PSTU publ., 2012. 225 p.
- [3] Blurtsian R.Sh., Zalazinskii M.G., Selikhov G.F., Blurtsian I.R. Issledovanie ostatochnykh napriazhenii poverkhnostnykh sloev torsionnykh valov [Study of residual stresses in surface layers of the torsion shafts]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii. Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii. 6-ia Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia* [New materials and technologies in mechanical engineering. 6th international scientific-technical conference]. Murom, MIVGU publ., 2006, no. 6, pp. 3–5.
- [4] Ulutan D., Erdem Alaca B., Lazoglu I. Analytical modelling of residual stresses in machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183, pp. 77–87.
- [5] Pasternak H., Launert B., Kannengießler T., Rhode M. Residual stresses and imperfections in welded high-strength I-shape sections. *6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, South Africa, 5–7 September 2016, pp. 1139–1146.
- [6] Silvestre E., De Argandoña E.S., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll leveling process. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 611–612, pp. 1753–1762.
- [7] Klimova L.G. *Upravlenie tekhnologicheskimi ostatochnymi napriazheniiami pri okhvativaiushchem deformirovanii malozhestkikh valov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Control of

- technological residual stresses in the deformation of the covering a little hard shafts. Cand. tech. sci. diss.]. Irkutsk, 2006. 189 p.
- [8] Abambres M., Quach W.-M. Residual stresses in steel members: A review of available analytical expressions. *International Journal of Structural Integrity*, 2016, vol. 7, is. 1, pp. 70–94.
- [9] Sazonov V.P., Larionova Iu.S. Issledovanie vlianiia radiusa i glubiny nadreza na kharakter raspredeleniia ostatochnykh napriazhenii v naimen'shem sechenii poverkhnostno uprochnennoi detail [Research of notch radius and depth influence on residual stresses distribution character in the smallest cross-section of surface hardened detail]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara university. Aerospace and mechanical engineering]. 2012, no. 5(36), pp. 120–122.
- [10] Mokrousov V.I. Koeffitsient pruzhineniia pri uprugoplasticheskom izgibe lista dlia sredey s lineinym uprochneniem [The coefficient spring with elastic-plastic bending of sheet for a medium with linear hardening]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist]. 2015, no. 23(103), pp. 180–188.
- [11] Shinkin V.N. Ostatochnye napriazheniia v poperechnom sechenii kruglogo brusa pri izgibe [Residual stresses in the cross section of a circular beam in bending]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of humanitarian and natural sciences]. 2016, no. 3–1, pp. 145–151.
- [12] Makeev S.A., Kolmakov D.M. Modelirovanie ostatochnykh napriazhenii v arochnom tonkostennom prokate trapetsievidnogo secheniia [Modeling of residual stress in arch thin wall rolled the trapezoidal cross-section]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk scientific Bulletin]. 2014, no. 1(127), pp. 145–151.

Статья поступила в редакцию 23.03.2017

Информация об авторах

КАРАТУШИН Станислав Иванович (Санкт-Петербург) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

ХРАМОВА Дария Алексеевна (Санкт-Петербург) — ассистент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: kxdaria@mail.ru).

БИЛЬДЮК Николай Алексеевич (Санкт-Петербург) — старший преподаватель кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1).

Information about the authors

KARATUSHIN Stanislav Ivanovich (Saint-Petersburg) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

KHRAMOVA Dariya Alekseevna (Saint-Petersburg) — Assistant Lecturer, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, kxdaria@mail.ru).

BILDYUK Nikolay Alekseevich (Saint-Petersburg) — Senior Lecturer, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1).