

1) усилие гибки при воздействии на трубу обкатного инструмента в 1,3–2,4 раза (в зависимости от режима работы установки) ниже, чем усилие гибки без использования обкатного инструмента;

2) наименьшее усилие гибки достигалось при минимальном значении продольной подачи;

3) при увеличении натяга свыше 1 мм происходит резкое увеличение усилия, которое можно объяснить образованием наплыва (заусенца) на наружной поверхности.

Список литературы

1. Козлов А.В., Бобылев А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.
2. Козлов А.В., Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М. Новая технология гибки труб // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. Челябинск: ЧГТУ, 1993.
3. Козлов А.В., Дерябин И.П. Холодная гибка с воздействием на изгибаемую трубу вращающимся раскатником-обкатником // Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте: труды междунар. конф. Самара: СамГТУ, 1999. Ч. 1.
4. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE STUDY OF POWER CHARACTERISTICS DURING PIPE BENDING WITH BURNISHING, USING AN AUTOMATED MODULE AND A PC

Mironov Kirill Andreevich – Postgraduate Student, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk. Russia. E-mail: mironovkir@yandex.ru.

Kozlov Alexander Vasilievich – D.Sc. (Eng.), Professor, the Zlatoust branch of the South Ural State University (NRU), Zlatoust, Russia. E-mail: a_kozlov55@mail.ru.

Sherkunov Viktor Georgievich – D.Sc. (Eng.), Professor, South Ural State University (NRU). Chelyabinsk, Russia. E-mail: sherkunovvg@susu.ac.ru.

Suvorov Andrey Leonidovich – Student, the Zlatoust branch of the South Ural State University (NRU). Zlatoust, Russia. E-mail: als_2991@mail.ru.

Abstract. This paper contains studies of pipe cold bending with burnishing. A bending force measuring device was developed. The developed laboratory facility and automated module were used to experimentally determine dependences between bending forces and bending technological modes.

Keywords: Pipe bending, experimental research, automated module, laboratory facility, bending forces.

References

1. Kozlov A.V., Bobylev A.V. *Tekhnologiya i oborudovanie kholodnoj gibki tonkostennykh trub: monografiya* [Technology and equipment for cold bending of thin-walled pipes: a monograph]. Chelyabinsk: Publishing house of SUSU, 2007.
2. Kozlov A.V., Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M. A new technology of bending pipes. *Progressivnaya tekhnologiya chistovoj i otdelochnoj obrabotki* [An advanced technology of finishing treatment]. Chelyabinsk: CSTU, 1993.
3. Kozlov A.V., Deryabin I.P. Cold bending, including treatment of pipes with a rotating burnisher. *Nadezhnost' i kachestvo v promyshlennosti, ehnergetike i na transporte: trudy mezhdunarodnoj konferentsii* [Reliability and quality in industry, power engineering and transport: proceedings of the international conference]. Samara: Samara State Technical University, 1999, part 1.
4. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1976.

Исследование силовых характеристик при гибке труб с обкатыванием, с использованием автоматизированного модуля и ПК / Миронов К.А., Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Суворов А.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 45–48.

Mironov K.A., Kozlov A.V., Sherkunov V.G., Suvorov A.L. The study of power characteristics during pipe bending with burnishing, using an automated module and a PC. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 45–48.

УДК 621.9.011: 621.9.019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНООСНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ

Трофимов В.Н., Карманов В.В., Панин Ю.В., Корионов М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения теоремы о разгрузке для определения остаточных макронапряжений при пластической деформации цилиндрического стержня. С использованием метода рентгеновской дифрактометрии экспериментально определены остаточные напряжения на поверхности стержня. Результаты

эксперимента использованы для теоретического расчёта остаточных напряжений. Сделаны выводы о возможности применения теоремы о разгрузке для теоретического определения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, рентгеновская дифрактометрия, теорема о разгрузке.

Введение

Повышение надежности изделий машиностроения требует учёта всё большего количества параметров, оказывающих влияние на их эксплуатационных характеристики. Одним из таких параметров является уровень остаточных напряжений 1 рода (по классификации Давиденкова Н.Н. [1], далее RS_1 – residual stresses 1 mode).

Экспериментальные методы определения RS_1 весьма трудоёмкие и чаще всего являются разрушающими методами [2]. Поэтому большой интерес представляют теоретические методы, которые основаны на анализе уравнений равновесия или на эквивалентных вариационных принципах.

В то же время интенсивное развитие техники для неразрушающего контроля механических характеристик металлов позволяет провести экспериментальную оценку теоретических положений, используемых для расчёта RS_1 .

Теоретическая часть

Рассмотрим некоторые теоретические методы и результаты их применения для определения RS_1 .

Одним из первых методов, позволяющих вычислять остаточные напряжения, была теорема о разгрузке [3]. Для вычисления RS_1 необходимо к напряжениям, которые имелись в теле при пластической деформации перед разгрузкой, прибавить в алгебраическом смысле напряжения, которые были бы в теле под действием внешней нагрузки противоположного знака, но в предположении упругих свойств тела. Существование достаточно большого количества методов решения упругопластических задач определили распространённость применения теоремы о разгрузке. Теорема о разгрузке справедлива тогда, когда процесс нагружения является простым и не возникают вторичные пластические деформации.

Для определения поля остаточных напряжений может быть использован функционал, предложенный Койтером В.Т. [4]:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \int_V A_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} dV + \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (1)$$

где A_{ijkl} – матрица упругих констант материала;

σ_{ij} – виртуальные остаточные напряжения; V – объём деформируемого тела; ε_{ij} – компоненты тензора пластических деформаций.

При использовании функционала (1) пластическое течение металла предполагается изотермическим. Если упругие константы материала в процессе деформации не изменяются и деформированный материал остаётся изотропным, то вариационный принцип эквивалентен теореме о разгрузке для идеального упругопластического материала.

В работе [5] доказана теорема, определяющая условие возникновения остаточных напряжений, и показано, что действительное поле остаточных напряжений сообщает минимум функционалу:

$$\Phi(\rho_{ij}^*) = \int_V \left(\frac{1}{2} C_{ijkl}^{-1} \rho_{ij}^* \rho_{kl}^* + \rho_{ij}^* \eta_{ij}^p + \rho_{ij}^* \eta_{ij}^T \right) dV, \quad (2)$$

где C_{ijkl}^{-1} – матрица упругих констант материала; ρ_{ij}^* – виртуальные остаточные напряжения, η_{ij}^p, η_{ij}^T – компоненты тензора пластической и температурной деформации.

Решения с использованием функционалов (1) и (2) предполагают применение соотношений механики континуальных сред. В реальных металлах существуют разрывы, связанные с наличием структурных дефектов – дислокациям и их скоплениям, субмикро- и микротрещинами, что ведёт к накоплению латентной энергии. Поэтому авторы работы [6] использовали энергетический подход для определения величины RS_1 , принимаемая ряд условий:

- условие эквивалентности латентной энергии и энергии остаточных напряжений $U_{ост}$;
- энергия остаточных напряжений $U_{ост}$ составляет часть энергии пластической деформации $U_{пл}$

$$U_{ост} = \psi \cdot U_{пл}; \quad (3)$$

– предварительно задана зависимость распределения RS_1 по сечению изделия в виде степенного ряда;

– деформируемый материал до и после деформации изотропный.

Используя соотношения теории упругости,

авторы работы [6] предложили методику определения компонентов тензора остаточных напряжений в осесимметричных телах.

Авторы работы [6] принимали $\psi = const$. Тогда, в соответствии с формулой (3), с ростом $U_{пл}$ должна возрастать и величина $U_{ост}$, что не всегда соответствует экспериментальным данным. Коэффициент ψ должен быть функцией, определяемой условиями деформирования, например интенсивностью деформации ε_i , которая неоднородна по сечению деформируемого тела. Поэтому для его определения необходимо иметь достаточную экспериментальную базу данных, что в настоящее время отсутствует. Также отметим, что при использовании формулы (3) сложно выделить долю, определяющую энергию RS_1 .

Приведенный краткий обзор позволяет сделать следующий вывод о том, что для расчёта RS_1 может быть использована теорема о разгрузке при соблюдении ряда условий:

- нагружение является простым;
- разгрузка происходит одновременно во всех точках сечения образца;
- отсутствуют вторичные пластические деформации;
- отсутствуют температурные деформации.

Такие условия реализуются при проведении стандартных статических испытаний на одноосное растяжение при комнатной температуре.

В данной статье предпринята попытка оценки возможности применения теоремы о разгрузке при одноосной пластической деформации путём сравнения расчётных и экспериментальных значений RS_1 , возникающих в сечении цилиндрического образца при одноосном растяжении.

В соответствии с теоремой о разгрузке для определения RS_1 необходимо иметь решение пластической и упругой задачи о растяжении образца.

При однородной пластической деформации цилиндрического образца осевые напряжения определяются по формуле $\sigma_z = P/F$ (P – действующая нагрузка, F – площадь поперечного сечения образца), а радиальные σ_r и окружные σ_φ напряжения равны нулю.

По окончании однородной деформации (при достижении предела прочности σ_B) образуется шейка (рис. 1), в области которой напряженно-деформированное состояние неоднородное.

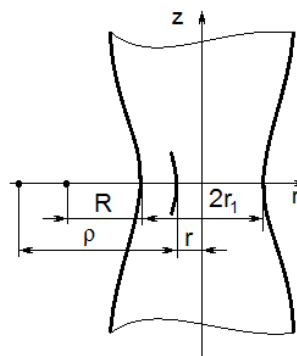


Рис. 1. Схема шейки образца

Существует ряд решений для определения компонентов тензора напряжений в наименьшем сечении шейки пластически деформированного цилиндрического стержня – Давиденкова Н.Н. и Спиридоновой Н.И. [1], Бриджмена П. [7], Остеева А.А. [8].

В данной статье для определения компонентов тензора напряжений в шейке при пластической деформации цилиндрического образца использовано решение [1], которое имеет вид

$$\sigma_z = \sigma_i \left(1 + \frac{r_1^2 - r^2}{2r_1 R} \right); \quad \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_i \frac{r_1^2 - r^2}{2r_1 R}; \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_i \left(1 + \frac{r_1}{4R} \right); \quad \bar{\sigma}_z = P / \pi r_1^2,$$

где σ_z , σ_θ , σ_r – осевое, окружное и радиальное напряжения соответственно; σ_i – интенсивность напряжений; $\bar{\sigma}_z$ – усредненное по сечению образца осевое напряжение; r_1 – радиус сечения шейки; R – радиус кривизны ее контура в меридиональном сечении.

Из формул (4) следует, что на поверхности образца радиальные и окружные напряжения равны нулю.

Для определения компонентов тензора напряжений при упругой деформации используется решение Г. Нейбера [9].

Предполагая, что в наименьшем сечении образующая профиля шейки имеет форму близкую к гиперболе, Г. Нейбер получил соотношения для определения компонентов тензора напряжений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{B - \alpha C}{\cos \beta} + \frac{B - A}{\cos^3 \beta}; \\ \sigma_r &= -\frac{A}{\cos \beta (1 + \cos \beta)} + \frac{A - B}{\cos^3 \beta} + \frac{(\alpha - 2) C}{\cos \beta}; \\ \sigma_\varphi &= \frac{A}{\cos \beta (1 + \cos \beta)} + \frac{(\alpha - 2) C - B}{\cos \beta}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $A = (\alpha - 1)(1 + \cos\beta_0)C$; $C = -\frac{P}{2} \cdot \frac{1 + \cos\beta_0}{1 + (2 - \alpha)\cos\beta_0 + \cos^2\beta_0}$; $\alpha = 2(1 - \mu)$; $B = A - C \cos^2\beta_0$;

$$\cos\beta_0 = \sqrt{\frac{1}{\frac{r_1}{R} + 1}}; \cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_1} \sin\beta_0\right)^2}; \sin\beta_0 = \sqrt{\frac{\frac{r_1}{R}}{\frac{r_1}{R} + 1}}$$

P – усилие нагружения образца;
 μ – коэффициент Пуассона.

Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента использовались полированные цилиндрические образцы из стали 45. Измерение RS_1 проводилось рентгеновским методом с использованием роботизированного измерительного комплекса XSTRESS. На **рис. 2** приведена схема измерений.

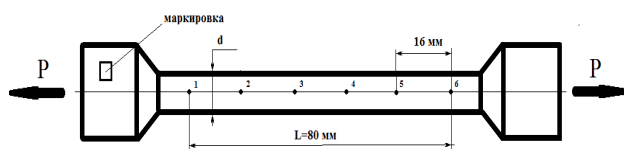


Рис. 2. Схема контрольных точек для измерения RS_1

Так как место начала образования шейки образца предварительно неизвестно, то определение RS_1 проводилось в точках 1-6. После образования шейки величина RS_1 определялась в наименьшем сечении шейки и в ближайших точках с обеих сторон шейки.

Нагружение образцов проводилось последовательно в несколько этапов:

Этап 1. Однородная пластическая деформация без образования шейки ($\sigma_z < \sigma_B$).

Этап 2. Пластическая деформация с локализацией в области шейки ($\sigma_z > \sigma_B$).

Этап 3. Пластическая деформация до момента, близкого к разрушению образца.

Последовательность этапов деформирования контролировалась по виду диаграммы растяжения. По окончании каждого этапа деформирования определялись геометрические параметры шейки.

На **рис. 3** приведена схема определения геометрических параметров шейки, необходимых для расчёта RS_1 . Определение производилось путем импорта фотографии шейки в среду графического редактора КОМПАС 2D/3D и обработки увеличенного изображения в следующей последовательности:

– по замеренному действительному диаметру шейки образца d_{uu} и размеру шейки d_1 на фото-

графии (см. **рис. 3**) определялся коэффициент масштабирования – $\mu = d_{uu} / d_1$;

– по трем точкам на контуре шейки определялся радиус R_1 окружности, наиболее прилегающей к контуру шейки;

– определялась действительная величина радиуса прилегающей окружности в наименьшем сечении шейки – $R = \mu \cdot R_1$.

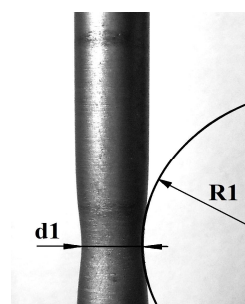


Рис. 3. Схема определения геометрических параметров шейки образца

Результаты расчёта и эксперимента

При проведении эксперимента использовались 3 образца. Результаты приведены в **табл. 1-3** (индексы: 0 – недеформированный образец; 1-3 – этапы деформирования).

Таблица 1

Размеры сечений образцов

Номер образца	До деформирования		Этап 1		Этап 2		Этап 3	
	d_0 , мм	F_0 , мм ²	d_1 , мм	F_1 , мм ²	d_2 , мм	F_2 , мм ²	d_3 , мм	F_3 , мм ²
1	9,8	75,39	9,5	70,85	7,5	44,18	7,2	40,72
2	9,8	75,39	9,2	66,44	6,8	36,32	6,5	33,18
3	9,8	75,39	9,1	65,01	7,3	41,85	7,1	39,59

Таблица 2

Осевые напряжения в сечении образцов

Номер образца	Этап 1		Этап 2		Этап 3	
	P , кгс	$\bar{\sigma}_z$	P , кгс	$\bar{\sigma}_z$	P , кгс	$\bar{\sigma}_z$
1	2480	343,2	3190	708,3	2900	698,7
2	2730	402,9	2880	778,0	2510	742,0
3	2750	414,8	2990	700,8	2670	661,6

Таблица 3
Результаты измерения осевых RS_1
в контрольных точках

Номер образца	Этап	RS_1 , МПа						Шейка
		1	2	3	4	5	6	
1	недеф.	-	-391,1	-402,1	-361,4	-390,3	-	-393,7
	1	-	199,2	206,1	232,3	228,5	-	216,5
	2	-	55,4	54,7	64,7	64,1	-	-94,3
	3	-	-118,2	50,3	-	-	-	-129,3
2	недеф.	-	-352,6	-296,2	-351,0	-270,8	-	-317,7
	1	-	139,5	122,5	146,6	146,0	-	138,7
	2	-	90,8	48,5	65,6	72,9	-	-92,5
	3	26,1	82,9	-	-	-	-	-108,3
3	недеф.	-	-337,2	-328,2	-370,5	-383,8	-	-354,9
	1	-	115,9	128,3	146,8	156,7	-	136,9
	2	-	33,0	43,9	38,3	65,2	-	-115,4
	3	61,2	41,5	-	-	-	-	-129,7

Примечание. Для недеформированных и однородно деформированных образцов (1 этап) определялось среднее значение остаточных напряжений по измерениям в точках 2-5.

Таблица 4
Геометрические параметры шейки образцов

Номер образца	d_w , мм	d_1 , мм	$\mu = d_w / d_1$	R_1 , мм	R , мм
2 этап					
1	7,5	63,25	0,118	209,24	24,69
2	6,8	54,73	0,124	135,52	16,81
3	7,3	44,94	0,162	143,39	23,23
3 этап					
1	7,2	43,58	0,165	117,56	19,39
2	6,5	56,70	0,114	127,12	14,57
3	7,1	62,29	0,116	166,81	19,28

Таблица 5
Расчётные значения RS_1

Номер образца	Метод расчёта	1 этап*		2 этап		3 этап	
1	[7]	343,2	0	682,1	0	667,4	0
	[9]	-	-	754,9	31,3	754,6	37,3
	RS_1	-	-	-72,8	-31,3	-87,2	-37,3
2	[7]	402,9	0	740,1	0	725,0	0
	[9]	-	-	845,7	45,0	837,6	48,1
	RS_1	-	-	-105,6	-45,0	-112,6	-48,1
3	[7]	414,8	0	674,0	0	623,4	0
	[9]	-	-	748,4	31,9	740,1	14,1
	RS_1	-	-	-74,4	-31,9	-116,3	-14,1

* Напряжения определялись по формуле $\sigma_r = P/F_1$.

Анализ результатов и выводы по работе

Отметим полученные результаты.

1. В исходном состоянии после полирования на поверхности всех образцов наблюдаются сжимающие осевые остаточные напряжения, обусловленные финишной технологической операцией при их изготовлении.

2. После однородной пластической деформации (этап 1) остаточные напряжения на поверхности растягивающие. В соответствии с теоремой о разгрузке остаточные напряжения должны отсутствовать.

3. После второго и третьего этапов нагружения экспериментальные и расчётные значения остаточных напряжений возрастают по модулю. При этом экспериментальные значения остаточных напряжений имеют больший модуль и возрастают интенсивнее, чем расчётные. Знак напряжений отрицательный.

4. По мере увеличения степени деформации разность расчётных и экспериментальных значений остаточных напряжений изменяются следующим образом:

- разность результатов для первого образца с ростом степени деформации увеличилась с 22,7 до 32,5%;
- разность результатов для второго образца с ростом степени деформации уменьшилась с 14,1 до 3,9%;
- разность результатов для третьего образца с ростом степени деформации уменьшилась с 35,5 до 10,0%.

Анализ полученных результатов показывает:

1. Знак экспериментальных и расчётных значений RS_1 совпадает.
2. После образования шейки наблюдается некоторая корреляция полученных значений RS_1 .

Сказанное свидетельствует о возможности применения теоремы о разгрузке даже при относительно больших пластических деформациях. Однако данный вывод требует дальнейшей проверки на больших партиях образцов из данного материала и других материалов.

Несмотря на неоднозначность, полученные результаты позволяют сделать некоторые практические выводы. Например, у осесимметричных прутковых изделий, полученных прокаткой или волочением, часто наблюдается саблевидность, которую исправляют путём растяжения с небольшими степенями пластической деформации.

Полученные в данной статье результаты показывают, что в этом случае на поверхности прутков возникают растягивающие RS_1 , что является благоприятным фактором. Для изменения знака RS_1 необходимо проводить дополнительную обработку поверхности прутков, например, шлифование и последующее полирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218.

Список литературы

1. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. 1945. № 6. С. 583.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 230 с.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч.1. Упругопластические деформации. М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
4. Койтер В.Т. Общие теоремы упругопластических сред. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 79 с.
5. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. 112 с.
6. Колмогоров Г.Л., Курапова Н.А., Мельникова Т.Е. Предельные режимы осесимметричного деформирования металлов // Вестник ПГТУ. Технологическая механика. 1996. №2. С. 16–24.
7. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
8. Остсемин А.А. К анализу напряженного состояния в эллиптической шейке образца при растяжении // Проблемы прочности. 2009. №4.
9. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 204 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN UNIAXIAL PLASTIC DEFORMATION OF A CYLINDRICAL ROD

Trofimov Viktor Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-40. E-mail: tvn_perm@mail.ru.

Karmanov Vadim Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-15-08. E-mail: karmanovs@yandex.ru.

Panin Yuri Valerievich – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-40, E-mail: dpm@pstu.ru.

Korionov Maxim Anatolievich – M. (Eng.), Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-40, E-mail: dpm@pstu.ru.

Abstract. The article discusses the possibility of applying a theorem on unloading to determine residual macroscopic stresses during plastic deformation of a cylindrical rod. X-ray diffractometry was used to experimentally determine residual stresses on a rod surface. The experimental results were used for the theoretical calculation of residual stresses. The authors made conclusions about the possibility of applying the theorem on unloading for the theoretical determination of residual stresses.

Keywords: Residual stresses, X-ray diffractometry, theorem on unloading.

References

1. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. Analiz napryazhennogo sostoyaniya v sheike rastyanutogo obratzsa [Analysis of the stress state in a neck of a stretched sample]. *Zavodskaya laboratoriya* [The plant laboratory], 1945, no. 6, 583 p.
2. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, 1963, 230 p.
3. Ilyushin A.A. *Plastichnost. Ch.1. Uprugoplasticheskie deformatsii* [Plasticity. P.1., Elastic-plastic deformation]. Moscow-Leningrad. Gostekhizdat, 1948, 376 p.
4. Koiter V.T. *Obshchie teoremy uprugoplasticheskikh sred* [General theorems of elastic-plastic media]. Moscow, 1961, 79 p.
5. Pozdееv A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses: theory and applications]. Moscow: Nauka, 1982, 112 p.
6. Kolmogorov G.L., Kurapova N.A., Melnikova T.E. *Predelnye rezhimy osesimmetrichnogo deformirovaniya metallov* [Limit modes of axisymmetric deformation of metals]. *Vestnik PGU. Tekhnologicheskaya mekhanika* [PSTU Technological Mechanics Bulletin], 1996, no. 2, pp. 16-24.
7. Bridgman P. *Issledovanie bolshikh plasticheskikh deformatsii i razryva* [Studies of large plastic deformations and fracture]. Moscow, 1955, 444 p.
8. Ostsemin A. A. Analysis of the stress state in an elliptical neck of the sample under tension. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 2009, no. 4.
9. Neiber G. *Kontsentratsiya napryazhenii* [The stress concentration]. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1947, 204 p.

Определение остаточных напряжений при одноосной пластической деформации цилиндрического стержня / Трофимов В.Н., Карманов В.В., Панин Ю.В., Корионов М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 48–53.

Trofimov V.N., Karmanov V.V., Panin Yu.V., Korionov M.A. Determination of residual stresses in uniaxial plastic deformation of a cylindrical rod. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 48–53.