

УДК 621.7.004

Р. Г. ПУЗЫРЬ, Р. Г. АРГАТ

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

Вимірювання деформацій і обчислення за ним поля напружень в обробці металів тиском методом тензометрування є добре зарекомендованим способом збору інформації про напружено-деформований стан. Проте в дослідженнях процесу радіально-ротаційного профілювання ободів коліс цей метод не отримав належного поширення через переміщення осередку деформації і відсутності вільних зон заготовки. У даній роботі наводяться результати тензометрування при моделюванні даного процесу. Деформації вимірюються в пружній зоні в статичному режимі, що дає можливість судити про їх розмір і спрямованість безпосередньо в осередку пластичної деформації. Наведено порівняльні дані експериментальних та теоретичних досліджень.

Ключові слова: обід, обечайка, деформація, тензорезистор, напруження, профілювання.

Измерение деформаций и вычисление по ним поля напряжений в обработке металлов давлением методом тензометрирования является хорошо зарекомендованным способом сбора информации о напряженно-деформированном состоянии. Однако в исследованиях процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес этот метод не получил должного распространения из-за перемещения очага деформации и отсутствия свободных зон заготовки. В данной работе приводятся результаты тензометрирования при моделировании данного процесса. Деформации измеряются в упругой зоне в статическом режиме, что дает возможность судить об их величине и направленности непосредственно в очаге пластической деформации. Приведены сравнительные данные экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: обод, обечайка, деформация, тензорезистор, напряжения, профилирование.

Dimension of strain and calculation on them of the stress field in the metal forming strain measurement method is a well-established way to gather information on the stress-strain state. However, studies of the process of radial rotation profile rims this method has not received proper distribution due to the movement of the deformation zone and the lack of available areas of the workpiece. In this paper, the results of strain measurement in the simulation of this process. Deformation is measured in the elastic zone in the static mode, which gives the opportunity to judge their size and orientation directly in the hearth of plastic deformation. Comparative data experimental and theoretical studies. The coincidence of the results is a proposal of 10%. It is shown that the magnitude of the meridional stretching deformation depends on the shape of workpiece and number of transition profiling

Keywords: rim, shell, deformation, lode cell, strain, profiling.

Ведение. При исследовании технологических процессов обработки металлов давлением, и в частности процессов вытяжки-формовки, электротензометрия получила наибольшее распространение [1]. В настоящее время доступна длинная линейка тензорезисторов различного исполнения и широким диапазоном параметров. К достоинствам тензометрии следует отнести возможность обработки данных в реальном времени, передачи на большие расстояния на устройство обработки, высокая чувствительность и разрешающая способность, низкая инерционность, высокая стабильность параметров и др. К недостаткам тензометрирования относится необходимость тарировки датчиков, а также зависимость сигнала с датчика от температуры и качества монтажа [2].

Анализ состояния вопроса. Измерение деформаций и вычисление по ним напряжений, которые действуют в очаге деформации при радиально-ротационном профилировании обода путем установки тензорезисторов, не представляется возможным из-за вращения обечайки относительно формирующего инструмента и, как следствие, перемещения очага деформации в каждый последующий момент процесса [3, 4].

Существующие методы решения задачи. Деформированное состояние полуфабриката в процессе профилирования определяют методом сеток [5]. При этом удается достаточно просто рассчитать интегральные компоненты тензора

напряжений и деформаций, что позволяет судить об общей картине распределения данных характеристик процесса по каждому переходу профилирования. Однако представляет интерес изучение поля напряжений в ходе непосредственного деформирования, что метод сеток обеспечить не может.

Цель работы. Качественное и количественное определение напряжений и деформаций в процессе радиально-ротационного профилирования ободьев колес, сравнение полученных результатов с формальными расчетами.

Методы исследования. Было предложено измерять деформации, действующие в очаге деформации косвенно в статическом режиме. Т. е. деформирующий инструмент останавливался в начале процесса профилирования, заготовка одевалась на внутренний ролик, а наружному предавалось движение подачи навстречу внутреннему. Таким образом, моделировался процесс профилирования в определенный момент за малый промежуток времени, осуществлялось так называемое «мгновенное обжатие».

Измерительная станция состояла из аналого-цифрового преобразователя Е14-440, блока питания АХ-1803D, операционного усилителя КР140УД1А и компьютера ASUS X552MJ. Вся участвующая в измерениях аппаратура прошла метрологический контроль в установленный срок. Тип применяемых тензорезисторов – КФ 5П1-5-200-А-12, с базой 5 мм, сопротивлением $R = 199,7 \pm 0,2$ Ом и

чувствительностью $K = 2,11$. Для наклейки резисторов использовался клей холодного отверждения циакрин ЭО.

Для регистрации сопротивлений рабочих тензорезисторов при их деформации использовали четвертьмостовую схему с одним рабочим тензопреобразователем без термокомпенсации, при этом непосредственно измеряли ток разбаланса моста.

Принимались следующие допущения:

- процесс является близким к монотонному деформированию и, следовательно, можно использовать положения деформационной теории пластичности;

- заготовка находится в условиях плоского напряженного и объемного деформированного состояния;

- материал заготовок изотропный, упругие деформации подчиняются закону Гука;

- компоненты деформации условно принимались средними и относились к центру ячейки;

- направление главных деформаций на поверхности заготовки известно, меридиональные деформации действуют вдоль образующих, тангенциальные – по окружности обечайки;

- объемная деформация значительно меньше возникающих в заготовке основных деформаций (это дает возможность использовать условие несжимаемости в упругой области $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$).



Рис. 1 – Первый переход радиально-ротационного профилирования обода колеса W8x16 (коническая заготовка)

При наклейке тензорезисторы ориентировались по направлениям главных напряжений (деформаций) (рис. 1). Для исследований выбирались по 5 моделей заготовок и полуфабрикатов после первого, второго и третьего переходов профилирования ободьев колес W8x16, 5,5Fх20, ДW20x26 и 9,00x22,5. Показания тензорезисторов для каждого типоразмера обода колеса усреднялись, при этом проводилась статистическая обработка полученных данных, согласно методики ДСТУ 8.207–76.

В ходе проводимых экспериментов необходимо было установить:

- 1) качественную картину распределения компонент тензора деформаций на боковой поверхности заготовок и полуфабрикатов;

- 2) количественную оценку, возникающим во время нагружения деформациям по периферии заготовки и сравнить полученные результаты с расчетными зависимостями;

- 3) влияние формы заготовки первого перехода профилирования на величину и характер распределения меридиональных и тангенциальных деформаций вне участка приложения нагрузки;

Плоское напряженное состояние на поверхности детали характеризуется тремя составляющими тензора напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} . Подсчитывались эти составляющие по трем измеренным компонентам тензора деформаций ϵ_x , ϵ_y и γ_{xy} при известных постоянных материала: модуле упругости первого рода E и модуле упругости второго рода G (для стали 08 кп $E=203$ ГПа; $G=83$ ГПа [6]), а так как деформации принимались главными, то главные нормальные и максимальное касательное напряжение в точке находили по следующим зависимостям [6]:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2), \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1),$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

Деформацию сдвига γ_{xy} напрямую измерить нельзя, так как тензорезисторы реагируют лишь на линейные деформации ϵ_x , ϵ_y и не чувствительны к деформациям сдвига [2] и в задачи исследований данные измерения не входили.

Результаты исследования. Типовые графики изменения напряжения АЦП от прилагаемой нагрузки приведены на рис. 2–5. после первичной математической обработки в прикладном пакете MathCad.

Как видно из представленных на рис. 2 графиков при наложении давления наружным роликом на цилиндрическую заготовку периферийная ее часть испытывает деформации. Графики имеют ступенчатый вид, где четко просматриваются участки приложения нагрузки и выдержки. Наиболее ярко выделяется показание 4 резистора, который расположен под углом 180° от места приложения давления. Он наклеен в тангенциальном направлении

в зоне формирования посадочной полки и испытывает деформации сжатия, что подтверждает факт изменения формы обечайки в процессе локального приложения нагрузки. Меридиональные деформации в данном месте фиксируются показаниями 6 резистора, который наклеен в зоне формирования центрального ручья. Во время приложения усилия на графике видна ступенька вниз, затем плавный подъем, что свидетельствует о возникновении сжимающих меридиональных деформаций во время нагружения и восстановлении формы в меридиальном направлении за интервал выдержки под нагрузкой. На участке, расположенном под углом 90° от зоны приложения давления просматривается деформация сжатия в меридиальном направлении, которая регистрируется двумя датчиками – 1 и 5. Причем датчик 1, который расположен в зоне формирования полки деформируется на порядок больше датчика 5, который наклеен на участке формовки центрального ручья. Количественная оценка деформаций проводилась на основе тарировочных кривых.

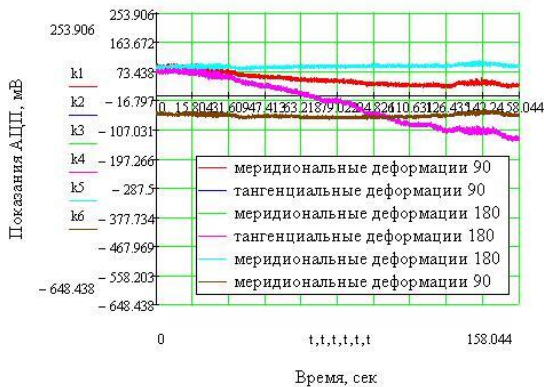


Рис. 2 – Профилирование цилиндрической заготовки (первый переход)

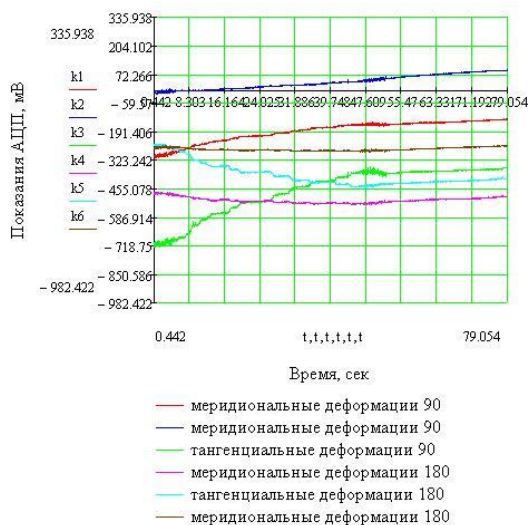


Рис. 3 – Профилирование конической заготовки (первый переход)

Анализируя представленные на рис. 3 данные, можно заключить, что коническая заготовка во время локального деформирования испытывает изменение формы начальной окружности, что вызывает возникновение знакопеременных деформаций. В зоне, расположенной под углом 90° относительно действующего нагружения возникают меридиональные и тангенциальные растягивающие деформации (резистор 1 расположен на участке формирования посадочных полок в меридиальном направлении, резистор 2 – в зоне центрального ручья; резистор 3 – на участке центрального ручья в тангенциальном направлении). Более интенсивно увеличиваются тангенциальные растягивающие деформации, что свидетельствует о их большей величине непосредственно в очаге пластической деформации. Если сравнивать меридиональные деформации, то видно, что на участке полок они имеют большую величину, чем в зоне центрального ручья. На участке, расположенном под углом 180° к нагрузке наблюдается обратная картина распределения деформаций. Здесь возникают сжимающие меридиональные и тангенциальные деформации (резисторы 4, 6 расположены в меридиальном направлении на участке формирования полок с двух противоположных сторон; резистор 5 – в тангенциальном направлении на отрезке формирования центрального ручья), однако интенсивность их роста заметно меньше, чем на участке, который находится ближе к действующей нагрузке.

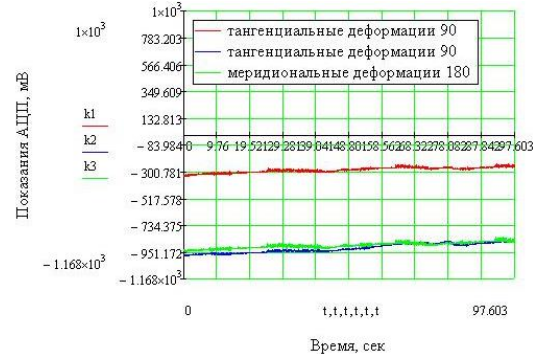


Рис. 4 – Второй переход профилирования

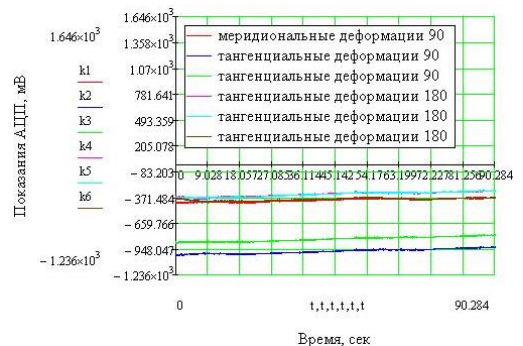


Рис. 5 – Третий переход профилирования

На графиках второго перехода наблюдается аналогичная картина распределения деформаций. На участке, который находится под углом 90° к действию нагрузки возникают растягивающие меридиональные

и тангенциальные деформации (датчики 2, 3 наклеены в тангенциальном направлении, датчик 1 – в меридиональном; располагаются в зоне центрального ручья), на противоположном участке возникают сжимающие тангенциальные деформации, как в зоне полки, так и в зоне центрального ручья. Однако, визуально можно оценить, что величина действующих деформаций намного меньше, чем в первом переходе профилирования. Это подтверждает факт увеличения жесткости полуфабриката второго перехода, так как после деформации на первом переходе он приобретает характерный профиль.

При нагружении полуфабриката на третьем переходе фиксируется небольшой рост растягивающих тангенциальных деформаций в зоне 90° как участка посадочной полки (резистор 2), так и участка центрального ручья (резистор 1). Однако, по сравнению с первым и вторым переходом меридиональные деформации, действующие в зоне 180° (резистор 3) становятся растягивающими и увеличиваются по ходу проведения опыта. Это может свидетельствовать о том, что более жесткий профиль третьего перехода не претерпевает изменения формы и не получает сжимающих тангенциальных деформаций в зоне противоположной нагрузке.

Как видно из приведенных графиков первого перехода цилиндрической и конической заготовок, их периферийная часть в процессе деформирования испытывает различные по направлению и величине напряжения. Так участок, расположенный под углом 90° для цилиндрической заготовки получает растягивающие меридиональные напряжения, как в зоне ручья, так и в зоне посадочной полки, что достаточно хорошо коррелирует с расчетными вычислениями – разница составила 13%. Наоборот, та часть цилиндрической заготовки, которая находится под углом 180° к поверхностной нагрузке, подвергается действию сжимающих тангенциальных напряжений, в то время как расчетные значения показывают действие здесь растягивающих, хотя по модулю их значения различаются на 15% [7–9].

Для конической заготовки под углом в 90° к нагрузке возникают растягивающие тангенциальные и меридиональные напряжения, которые совпадают по направлению для двух методик исследования. Их разница по величине составила: для меридиональных напряжений – 25% (участок ручья), 26% (участок полки); для тангенциальных напряжений – 4% (участок полки). В зоне 180° относительно действующего давления в эксперименте фиксировались тангенциальные и меридиональные напряжения сжатия, что подтверждают также расчетные данные. Различие в количественном отношении между полученными данными: для меридиональных напряжений – 9,1% (зона полки); для тангенциальных напряжений – 13% (зона ручья). Следовательно, на первом переходе профилирования

напряженно-деформированное состояние заготовки зависит от формы полуфабриката и зоны расположения датчиков или угла отсчета для формальных вычислений. Опытные значения меридиональных напряжений отличаются от расчетных в некоторых случаях знаком, то есть их направлением действия. Данное явление объясняется принятым допущением о том, что нагрузка распределена по поверхности заготовки симметрично и направление действия напряжений изменяется в зависимости от угла обхода окружности заготовки также симметрично, относительно места приложения усилия по закону косинуса. Также в математических моделях и соответственно в решениях не учитывается переходная зона, которая присутствует при локальном формовании профиля и оказывает влияние на распределение компонент тензора напряжений на его периферийных участках. В этом случае всегда имеет место неравномерная по ширине заготовки тангенциальная деформация металла [11].

На последующих переходах профилирования для всех типоразмеров ободьев колес величина экспериментальных значений напряжений достаточно хорошо совпадает с расчетными данными, отклонения не превышают 15%. Но как показано выше, значения напряжений на участке, расположенном под углом 180° отличаются знаком. Это явление не вносит критических корректив при определении компонент тензора напряжений в очаге деформации, но при проектировании ресурсосберегающих технологических процессов радиально-ротационного профилирования необходимо обращать особое внимание на деформацию боковой поверхности заготовки и тем самым, определять зоны силового догружения.

Выводы. Качественная оценка распределения компонент тензора деформаций при радиально-ротационном профилировании, которая рассматривалась выше, характерна для всех исследуемых профилей: W8x16, 5,5Fx20, DW20x26 и 9,00x22,5. Не зависимо от схемы профилирования боковая поверхность заготовки, свободная от действия инструмента, получает знакопеременные тангенциальные и меридиональные деформации. Их величина и направление будет зависеть от номера перехода, схемы нагружения и участка свободной поверхности обечайки.

Список литературы

1. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник / Н.И. Пригоровский. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
2. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич. – Минск: Высшейшая школа, 1975. – 352 с.
3. Чигиринский В.В. Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: [Монография] / В.В. Чигиринский, В.Л. Мазур, С.Б. Беликов, [и др.]. – Днепропетровск: ПИА «Днепр-VAL», 2010. – 309 с.

4. Потекушин Н.В. Усилие при радиальном профилировании обечаек на первых переходах / Н.В. Потекушин, Г.Е. Березюк, В.Ф. Троян, А.Г. Слепынин // Автомобильная промышленность. – 1977. – №5. – С. 24–29.

5. Puzyr R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims / R. Puzyr, T. Haikova, O. Trotsko, R. Argat // Astern-european journal of enterprise technologies. Industrial and technology systems. – 2016. – VOL. 4. – NO 1(82). – P. 52–60.

6. Хан Х. Теория упругости : Основы линейной теории и ее применения : Пер. с нем. / Х. Хан. – М. : Мир, 1988. – 344 с.

7. Пузырь Р.Г. Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента / Р.Г. Пузырь, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская // Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. М. : МГТУ «Станкин», 2013. – №4 (27). – С. 42–47.

8. Пузырь Р.Г. Распределение напряжений на коническом участке профиля полуфабриката первого перехода радиально-ротационного профилирования / Р.Г. Пузырь, О.Н. Долгих, Б.С. Гриценко, Л.Э. Дикая // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2015. – Випуск 3(92), часть 1. – С. 67–73.

9. Пузырь Р.Г. Расчет компонент тензора напряжений на втором переходе радиально-ротационного профилирования ободьев колес транспортных средств / Р.Г. Пузырь // Сборник научных трудов «Обработка материалов давлением». – Краматорск : ДГМА, 2016. – №1 (42). – С. 164–168

10. Тришевский И.С. Теоретические основы процесса профилирования / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. М. : Металлургия, 1980. – 288 с.

References (transliterated)

1. Prigorovskij N.I. *Metody i sredstva opredelenija polej deformacij i naprjazhenij: Spravochnik* [Methods and means of determining the fields of deformations and stresses: Reference book]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 248 p.

2. Shushkevich V.A. *Osnovy jelektrotenzometrii* [Fundamentals of electrocentrale]. Minsk, Vyshejschaja shkola, 1975. 352 p.

3. Chigirinskij V.V., Mazur V.L., Belikov S.B., Kolesnik F.I., Legotcin G.I., Slepynin A.G., Shevchenko T.G. *Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnyh sredstv i sel'skhozjajstvennoj*

tehniki : [Monografija] [Modern production of wheels of motor vehicles and agricultural machinery]. Dnepropetrovsk, RIA «Dnepr-VAL», 2010. 309 p.

4. Potekushin N.V., Berezjuk G.E., Trojan V.F., Slepynin A.G. Usilie pri radial'nom profilirovanii obechaek na pervyh perehodah [Force in the radial profiling of the shells at first transitions]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 1977, №5, pp. 24–29.

5. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Astern-european journal of enterprise technologies. Industrial and technology systems*. 2016, VOL. 4, No 1(82), pp. 52–60.

6. Han H. *Teorija uprugosti : Osnovy linejnoy teorii i ee primenenija : Per. s nem.* [Theory of elasticity : Foundations of linear theory and its applications]. Moscow, Mir, 1988, 344 p.

7. Puzyr' R.G., Sosenushkin E.N., Janovskaja E.A. Ustanovlenie polja naprjazhenij pri radial'no-rotacionnom profilirovanii cilindricheskoj zagotovki bez ucheta radiusov zakruglenija deformirujushhego instrumenta [The establishment of a stress field with radial-profiling of a rotating cylindrical workpiece without taking into account the radii of curvature of the deforming tool]. *Vestnik MGTU «Stankin»*. *Nauchnyj recenziruemyj zhurnal*. Moscow, MGTU «Stankin», 2013, №4 (27), pp. 42–47.

8. Puzyr' R.G., Dolgih O.N., Gricenko B.S., Dikaja L.Je. Raspredelenie naprjazhenij na konicheskom uchastke profilja polufabrikata pervogo perehoda radial'no-rotacionnogo profilirovanija [The stress distribution on the conical portion of the profile prefabricated transition on first radial rotary profiling]. *Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo*. Kremenchuk, KrNU, 2015, Vipusk 3(92), chast' 1, pp. 67–73.

9. Puzyr' R.G. Raschet komponent tenzora naprjazhenij na vtorom perehode radial'no-rotacionnogo profilirovanija obod'ev koles transportnyh sredstv [The calculation of the component stress tensor at the second transition radial rotation profile rims wheels of vehicles] *Sbornik nauchnyh trudov «Obrabotka materialov davleniem»*. Kramatorsk, DGMA, 2016, №1 (42), pp. 164–168.

10. Trishevskij I.S., Doktorov M.E. *Teoreticheskie osnovy processa profilirovanija* [The theoretical basis of the profiling process]. Moscow, Metallurgija, 1980. 288 p.

Поступила (received) 08.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вимірювання деформацій при моделюванні радіально-ротаційного профілювання ободів коліс методом тензометрування / Р. Г. Пузырь, Р. Г. Аргат // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 63–68. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

Измерение деформаций при моделировании радиально-ротационного профилирования ободьев колес методом тензометрирования / Р. Г. Пузырь, Р. Г. Аргат // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 63–68. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

Dimension of deformations in the modeling radial rotation profile rim strain measurement method / R. G. Puzyr, R. G. Argat // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 63–68. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пузир Руслан Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (067) 601-67-47; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Пузырь Руслан Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (067) 601-67-47; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Puzyr Ruslan Grigorjevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering; tel.: (067) 601-67-47; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Аргат Роман Григорович – старший викладач, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (067) 530-55-73; e-mail: argat@ua.fm.

Аргат Роман Григорьевич – старший преподаватель, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (067) 530-55-73; e-mail: argat@ua.fm.

Argat Roman Grigorjevich – Senior Lecturer, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering; tel.: (067) 530-55-73; e-mail: argat@ua.fm.