Bibliography (transliterated): 1. *Trishevskij I.S.* Issledovanie deformacij metalla pri plasticheskom izgibe na 180° / I.S. Trishevskij, V.P. Stukalov // Teorija i tehnologija proizvodstva gnutyh profilej prokata. Sbornik trudov. Issue XV.–Kharkiv, UkrNIIMet, 1970. **2.** *Trishevskij I.S.* Issledovanie vlijanija utonenija na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie metalla polosy v meste izgiba i izmenenie shiriny zagotovki pri profilirovanii / *I.S. Trishevskij, Ju.N. Alekseev, V.M. Shheglov* // Teorija i tehnologija proizvodstva gnutyh profilej prokata. Sbornik trudov. Issue XV.–Kharkiv, UkrNIIMet, 1970. **3.** *Alekseev Ju.N.* Voprosy plasticheskogo techenija metallov. – Kharkiv: HGU, 1958. – 188 p. **4.** *Alekseev Ju.N.* Vvedenie v teoriju obrabotki metallov davleniem, prokatkoj i rezaniem. – Kharkiv: HGU, 1958. – 188 p. **5.** *Il'jushin A.A.* Mehanika sploshnoj sredy. 3rd ed. – Moscow: MGU, 1990. – 285 p. **6.** *Gun G.Ja.* Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1983. – 285 p. **7.** *Sedov L.I.* Mehanika sploshnoj sredy: in 2 volumes, vol. 1 – 4-th ed. – Moscow: Nauka, 1983. – 540 p. **8.** *Plesnecov S.Ju.* Modelirovanie izgiba metalla na 180° i issledovanie ego deformirovannogo sostojanija s ispol'zovaniem cifrovyh metodov.–Visnik NTU «KhPI».. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2009. – N 15 (948).

Поступила (received) 06.11.2015

УДК. 621.7.044

Р. Г. ПУЗЫРЬ, канд. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчуг

РАСЧЕТ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА РАДИУСЕ ЗАКРУГЛЕНИЯ ПРОФИЛИРУЮЩЕГО РОЛИКА ПРИ РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

Рассматриваются вопросы определения поля напряжений при формоизменении ободьев колес из стальных заготовок на первом переходе радиально-ротационного профилирования. Интерес представляет определение напряжений на радиусе закругления профилирующего ролика, так как именно места сопряжений различных элементов профиля обода испытывают во время эксплуатации наибольшие нагрузки. Результаты теоретического исследования позволяют анализировать возникающие в процессе деформирования напряжения и определять совокупность технологических и конструкторских параметров процесса профилирования, которые оказывают значительное влияние на величину и распределение нормальных и касательных напряжений.

Ключевые слова: обод, профилирование, заготовка, радиус закругления, деформация.

Введение. Одним из определяющих технологических параметров процесса профилирования ободьев колес является минимально допустимая толщина металла в местах радиусных переходов профиля, поэтому толщину заготовки необходимо выбирать такой, чтобы это условие было выполнено, и одновременно не допустить утяжеления ободьев изначально ее завысив.

Анализ последних исследований и литературы. Как показывают исследования по теории и эксперименту радиально-ротационного профилирования [1–3], а также расчеты на прочность обода колеса во время эксплуатации [4, 5], наибольший интерес вызывают публикации, направленные на установление поля напряжений и деформаций, действующих на радиусах

© Р. Г. Пузырь, 2015

закругления профиля колеса в процессе радиально-ротационного профилирования и в готовом изделии при нагружении его внешними силами.

Цель исследований, постановка проблемы. Поэтому исследования, связанные с определением компонент тензора напряжений и деформаций на радиусах закругления полуфабриката в процессе деформации являются наиболее актуальными.

Материалы исследований. Для решения задачи по определению компонент тензора напряжений на радиусах закругления ободьев колес исходили из гипотез и допущений безмоментной технической теории оболочек вращения [6]. Профиль обода рассекали сечениями, перпендикулярными и параллельными к оси заготовки, для получения простых геометрических тел (рис. 1).

При сопряжении цилиндрической оболочки с оболочками другого профиля необходимо выполнение граничных условий: равенство радиальных перемещений или равенство окружных деформаций; равенство углов поворота нормали; равенство моментов; равенство сил распора, т, е. радиальных составляющих внутренних сил.

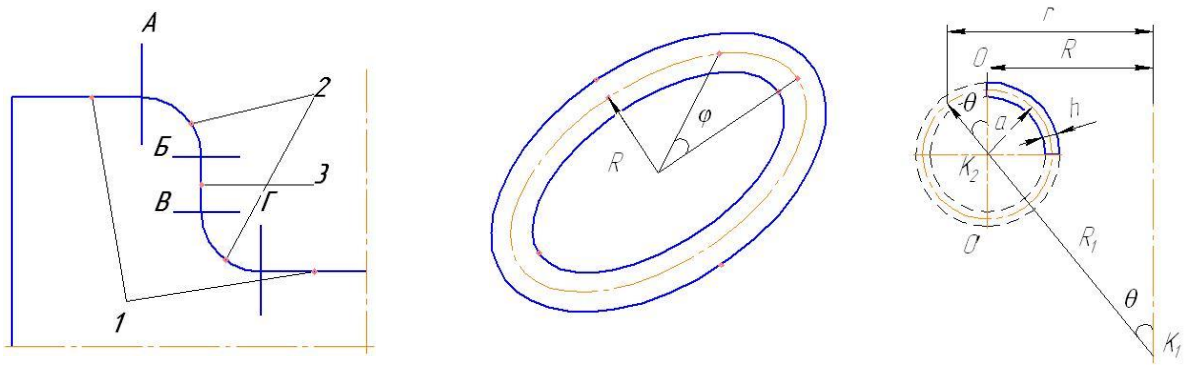

Рис. 1 – Профиль обода колеса после первого перехода профилирования и тороидальная оболочка с принятыми обозначениями: А, Б, В, Г – сечения профиля; 1, 3 – цилиндрические поверхности, 2 – тороидальные поверхности

Рассмотрим верхнюю тороидальную поверхность, которая образована вследствие раздачи части цилиндрической заготовки нижним роликом. Используем для решения задачи общие уравнения равновесия оболочек вращения. Обозначим через a радиус сечения и через R – расстояние от оси до центра сечения. Введем криволинейные координаты θ и φ; под θ понимается

полярный угол в плоскости меридиана, под φ – угол в плоскости параллельного круга. Один из главных радиусов кривизны, соответствующий меридиану, совпадает с радиусом сечения и равен $R_2 = a$; второй, отвечающий параллельному кругу, по теореме Менье равен $R_1 = \dfrac{r}{\sin\theta}$, где r – расстояние от оси симметрии до некоторой точки серединной поверхности [8], $r = R + a\sin\theta = a\dfrac{(1 + k\sin\theta)}{k}$, где $k = \dfrac{a}{R}$.

В общих уравнениях равновесия не учитываем изгибающие и крутящие моменты, и перерезывающие усилия, а также поверхностную нагрузку, тогда они в проекциях на касательные θ и φ примут вид [8]

$$\begin{aligned}
&a\frac{\partial N_1}{\partial\varphi} + 2a\cos\theta\cdot S + \frac{a}{k}(1 + k\sin\varphi)\frac{\partial S}{\partial\theta} = 0,\\
&a\cos\theta\cdot N_2 + \frac{a}{k}(1 + k\sin\varphi)\frac{\partial N_2}{\partial\theta} + a\frac{\partial S}{\partial\varphi} - a\cos\theta\cdot N_1 = 0,\\
&\frac{k\sin\theta\cdot N_1}{a(1 + k\sin\theta)} + \frac{N_2}{a} = 0.
\end{aligned} \tag{1}$$

Выразим из третьего уравнения системы N_2 и подставим его во второе уравнение равновесия, проведя не сложные преобразования, получим, возьмем решение уравнений в виде

$$N_1 = T_\theta\cos\varphi \text{ и } S = T_{\varphi\theta}\sin\varphi, \tag{2}$$

где T_θ и $T_{\varphi\theta}$ – функции одного θ.

После подстановки их в уравнения системы (1) получим для определения этих функций обыкновенные дифференциальные уравнения. Складывая и вычитая эти уравнения и вводя обозначения $L_1 = T_{\varphi\theta} + T_\theta$ и $L_2 = T_{\varphi\theta} - T_\theta$, после некоторых преобразований получим два следующих обыкновенных дифференциальных уравнения, каждое из которых содержит одно неизвестное

$$\begin{aligned}
&\frac{dL_2}{d\theta}\left(\frac{1}{2k} + \sin\theta\right) + L_2(2\cos\theta + 1) = 0,\\
&\frac{dL_1}{d\theta}\left(\frac{1}{2k} + \sin\theta\right) + L_1(2\cos\theta - 1) = 0.
\end{aligned} \tag{3}$$

Интегрирование уравнений (4.58) производим с помощью разделения переменных и подстановки $u = tg\frac{\theta}{2}$, при этом интегралы рационализируются и, опуская не нужные выкладки, окончательно получим

$$N_1 = \left[\left(tg^2\frac{\theta}{2} + 4ktg\frac{\theta}{2} + 1\right)^{4k}\left(\frac{e^{-A}C_1}{2} - \frac{e^{-B}C_2}{2}\right)\right]cos\varphi,$$
$$S = \left[\left(tg^2\frac{\theta}{2} + 4ktg\frac{\theta}{2} + 1\right)^{4k}\left(\frac{e^{-A}C_1}{2} + \frac{e^{-B}C_2}{2}\right)\right]sin\varphi. \quad (4)$$

где $A = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}}arctg\frac{tg\frac{\theta}{2} + 2k}{\sqrt{1-4k^2}}(4k+1)$;

$$B = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}}arctg\frac{tg\frac{\theta}{2} + 2k}{\sqrt{1-4k^2}}(4k+3).$$

Левый конец тороидальной оболочки сопрягается с цилиндром, значит, должны выполнятся равенства: $N_1 = N_x, S_ц = S_T$, где $N_x, S_ц$ – решения для меридиональных и касательных усилий, полученные для цилиндрической заготовки [9]. Граничные условия на левом торце: при $\theta = 0, \varphi = 0, x = 0$

$$N_1 = \sum_m\sum_n \frac{\sigma_s l}{m\pi R_0}\left(\frac{n^2 l^3 Sin\varphi_0 n}{3R_0^2\pi(1-\pi m)} + \frac{2hs_n}{3l(1-k_{разд})}\right)Sin\varphi_0 n,$$

при $\theta = 0, \varphi = 90°, x = 0$

$$S = 0.$$

Подставляем данные граничные условия в (4) и получим

$$C_1 = \sum_m\sum_n \frac{2\sigma_s l}{m\pi R_0}\left(\frac{n^2 l^3 Sin\varphi_0 n}{3R_0^2\pi(1-\pi m)} + \frac{2hs_n}{3l(1-k_{разд})}\right)\frac{Sin\varphi_0 n}{e^{-A_1}}$$
$$C_2 = \sum_m\sum_n -\frac{2\sigma_s l}{m\pi R_0}\left(\frac{n^2 l^3 Sin\varphi_0 n}{3R_0^2\pi(1-\pi m)} + \frac{2hs_n}{3l(1-k_{разд})}\right)\frac{Sin\varphi_0 n}{e^{-B_1}}, \quad (5)$$

где $A_1 = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}} arctg \frac{2k}{\sqrt{1-4k^2}}(4k+1)$;

$$B_1 = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}} arctg \frac{2k}{\sqrt{1-4k^2}}(4k+3).$$

Значения усилий будут иметь вид

$$N_1 = \left[\begin{array}{l} \left(tg^2 \frac{\theta}{2} + 4ktg\frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}} + \frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}} \right) \times \\ \times \sum_m \sum_n \frac{2\sigma_s l}{m\pi R_0} \left(\frac{n^2 l^3 Sin\varphi_0 n}{3R_0^2 \pi (1-\pi m)} + \frac{2hs_n}{3l(1-k_{разд})} \right) Sin\varphi_0 n \end{array} \right] cos\varphi,$$

$$S = \left[\begin{array}{l} \left(tg^2 \frac{\theta}{2} + 4ktg\frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}} - \frac{e^{-B} e^{-A_1}}{2e^{-B_1}} \right) \times \\ \times \sum_m \sum_n \frac{2\sigma_s l}{m\pi R_0} \left(\frac{n^2 l^3 Sin\varphi_0 n}{3R_0^2 \pi (1-\pi m)} + \frac{2hs_n}{3l(1-k_{разд})} \right) Sin\varphi_0 n \end{array} \right] sin\varphi. \quad (6)$$

Для определения величины тангенциальных напряжений в очаге деформации используем условия перехода в пластическое состояние по гипотезе максимальных касательных напряжений

$$\sigma_y = \sigma_x - \sqrt{\sigma_S^2 - 4\tau^2}. \quad (7)$$

За пределами очага деформации тангенциальные напряжения находим из третьего уравнения системы (1).

Так как меридиональные напряжения являются наиболее опасными, с точки зрения получения качественных изделий, которые приводят к чрезмерным утонениям профиля, к потере устойчивости и даже появлению трещин и разрушению заготовки то, проанализируем первое уравнение системы (6).

Первый и второй множители уравнения учитывают изменение напряжений в процессе деформации на радиусе закругления профиля, третий – величину меридиональных напряжений на цилиндрическом участке. С увеличением координаты θ растут первый и второй множители и увеличиваются меридиональные напряжения. Первый множитель выражения (6) при увеличении θ от 90 до 175° (при $\theta=180^o$ – тангенс не существует)

изменяется от $\left(tg^2\frac{\theta}{2}+4ktg\frac{\theta}{2}+1\right)^{4k}\approx 1$ до $\left(tg^2\frac{\theta}{2}+4ktg\frac{\theta}{2}+1\right)^{4k}\approx 3{,}5$, он оказывает значительное влияние на распределение напряжений на закругленном участке. Полученный результат соответствует положениям теории листовой штамповки, где меридиональные напряжения увеличиваются при увеличении угла охвата радиуса закругления матрицы при вытяжке. Второй множитель – $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)$ с ростом угла θ уменьшается, так для $\theta=0^o$, $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=1$; $\theta=5^o$, $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=0{,}92$, для $\theta=20^o$, $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=0{,}88$; $\theta=90^o$, $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=0{,}73$. Кроме того показатель $k=\frac{a}{R}$, характеризующий отношение радиуса закругления ролика к радиусу заготовки не остается постоянной величиной, а динамически изменяется. Для верхнего закругленного участка R увеличивается, так как происходит раздача левой части заготовки, a – при этом остается постоянным, k – уменьшается. Для обода колеса W12x24, для которого размеры обечайки равны: $l=380$ *мм*; $D=568$ *мм*; $h=4{,}5$ *мм* по заводскому технологическому процессу после первого перехода профилирования $D_n=610$ *мм*; $D_p=556$ *мм*; $a_n=15$ *мм*; $a_p=30$ *мм*, где D_n, D_p – диаметры полки и ручья обода соответственно; a_n, a_p – радиусы закругления профиля обода от полки к стенке монтажного ручья и от стенки монтажного ручья к монтажному ручью соответственно. Для двух предельных случаев участка раздачи получим: при $\theta=90^o$, $k=\frac{15}{305}=0{,}049$, $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=1$, так как на входе в очаг деформации показатели A, B и A_1, B_1 равны между собой; при $\theta=175^o$, $k=\frac{15}{305-15}=0{,}051$, $\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=0{,}76$. Наблюдается еще большее уменьшение уровня меридиональных напряжений на выходе из закругленного

участка. Однако во втором предельном случае, когда $\theta=175^o$ первый множитель равен 3,5 и окончательно получим $\left(tg^2\frac{\theta}{2}+4ktg\frac{\theta}{2}+1\right)^{4k}\times\left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}}+\frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}}\right)=3{,}5\times 0{,}76\approx 2{,}7$.

Данные расчеты показывают, что с увеличением охвата радиуса закругления деформирующего ролика металлом заготовки на участке раздачи величина меридиональных напряжений возрастает в 2,7 раза к концу процесса деформирования, когда материал заготовки полностью охватит радиус закругления нижнего ролика.

Для участка обжима заготовки будем иметь аналогичные зависимости, как и для участка раздачи, где меридиональные напряжения увеличиваются и в конце перехода радиально-ротационного профилирования будут в 5,2 раза больше чем на цилиндрическом участке профиля полуфабриката для обода колеса *W*12x24.

Выводы. Обобщая полученные результаты, можно сказать, что на распределение и величину меридиональных напряжений на закругленных участках профиля обода в процессе деформирования оказывают влияние угол охвата радиуса закругления ролика материалом заготовки θ и показатель $k=\frac{a}{R}$, который равен отношению радиуса закругления профиля к радиусу заготовки. Поэтому, при радиально-ротационном профилировании для снижения величины меридиональных напряжений на закругленных участках необходимо стремится к увеличению показателя k и уменьшению угла θ для участка раздачи и обжима заготовки.

Список литературы. **1**. *Потекушин Н.В.* Исследование напряжений при радиальном профилировании заготовок на первых переходах / Н.В. Потекушин, Э.З. Сайфулин. – В кн.: Обработка металлов давлением. Свердловск, УПИ.– 1974. – вып. 2. – С. 111–114. **2.** Чигиринский В.В. Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: [Монография] / В.В. Чигиринский, В.Л. Мазур, С.В. Беликов и др. – Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. – 309 с. **3.** Мосьпан Д.В. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес / Д. В. Мосьпан, В.В. Драгобецкий, Р.Г. Пузырь // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 6(53), частина 2 – С. 64-66. **4.** Guo Y.Q. Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplied inverse approach / Y.Q. Guo, et al // Comput. Struct. 2000. – 78. – P. 133–148. **5.** Балабин И.В. Расчет напряженного состояния ободьев колес / И.В. Балабин, В.Г. Бондарь, Л.Г. Сухомлинов // Тр. НАМИ, 1983. – вып. 189. – С. 24–43. **6.** Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 635 с. **7.** Филин А.П. Элементы теории оболочек / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. – 256 с. **8.** Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М.: Главн. ред. физико-математической литературы, 1967. – 984 с. **9.** 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.

Bibliography (transliterated): 1. Potekushin N.V., Je.Z. Sajfulin "Issledovanie naprjazhenij pri radial'nom profilirovanii zagotovok na pervyh perehodah» *V kn.: Obrabotka metallov davleniem. Sverdlovsk, UPI.* No. 2. 1974. 111–114. Print. **2.** Chigirinskij V.V., V.L. Mazur, and S.V. Belikov. Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnyh sredstv i sel'skohozjajstvennoj tehniki: [Monografija]. *Dnepropetrovsk: RIA «Dnepr-VAL»,* 2010. Print. **3.** Mos'pan D.V., V.V. Dragobeckij, R.G. Puzyr' "Opredelenie potrebnogo krutjashhego momenta pri radial'no-rotacionnom profilirovanii obod'ev koles». *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo. Kremenchuk: KDPU,* No. 6.53. 2008. chastina 2. 64-66. Print. **4.** Guo Y.Q. "Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplied inverse approach». *Comput. Struct.* No. 78. 2000.133–148. Print. **5.** Balabin I.V., V.G. Bondar' and L.G. Suhomlinov "Raschet naprjazhennogo sostojanija obod'ev koles.» *Tr. NAMI.* No.189. 1983. 24–43. Print. **6.** Timoshenko S. P. and S. Vojnovskij-Kriger. *Plastinki i obolochki* Moscow: Nauka, 1966. 635. Print. **7.** Filin A.P. *Jelementy teorii obolochek* Leningrad: Strojizdat, Leningr. otd-nie, 1975. 256. Print. **8.** Vol'mir A. S. *Ustojchivost' deformiruemyh system* Moscow: Glavn. red. fiziko-matematicheskoj literatury, 1967. 984. Print. **9.** Puzyr' R.G., E.N. Sosenushkin and E.A. Janovskaja "Ustanovlenie polja naprjazhenij pri radial'no-rotacionnom profilirovanii cilindricheskoj zagotovki bez ucheta radiusov zakruglenija deformirujushhego instrumenta» *Moscow: MGTU «Stankin».* No. 4.27. 2013. 42–47. Print.

Поступила (received) 22.10.2015

УДК 621.777

Ю. Г. РОЗОВ, докт. техн. наук, доц., Херсонский национальный технический университет

ГИДРОЭКСТРУЗИЯ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМ ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПОДВИЖНОЙ ГЛАДКОЙ ОПРАВКЕ

В статье предложена новая перспективная технология гидропрессования ствольной заготовки на подвижной гладкой оправке. Разработанная технология получения длинномерных ствольных заготовок позволяет снизить себестоимость изготовления изделий и повысить продуктивность производства стволов стрелкового оружия, за счёт исключения из технологического процесса методов получения заготовок на специальном оборудовании.

Ключевые слова: технология, гидропрессование, оправка, ствол, ствольная заготовка, моделирование, пресс, штамповая оснастка, матрица.

Введение. Толстостенные трубчатые изделия ($s > 0.1R_{ср}$, где: s – толщина стенки, $R_{ср}$ – радиус срединной поверхности трубчатой заготовки) с прецизионными элементами внутреннего профиля (6…8 квалитет, при шероховатости 0.16…0.32 мкм) достаточно широко применяются в машиностроении, приборостроении и изделиях специального назначения.

© Ю. Г. Розов, 2015