

УДК 621.7.044

Р.Г. Пузырь, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина

РАСЧЕТ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ ПРОФИЛЯ ОБОДА КОЛЕСА С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ НАГРУЗКИ

Розглядаються питання визначення поля напружень при формозміні ободів коліс із сталевих циліндричних заготовок на першому переході радіально-ротаційного профілювання. Результати теоретичного дослідження дозволяють аналізувати напруження, що виникають в процесі деформування, і визначити сукупність технологічних і конструкторських параметрів процесу профілювання, які значно впливають на величину і розподіл нормальних і дотичних напружень.

Рассматриваются вопросы определения поля напряжений при формоизменении ободьев колес из стальных цилиндрических заготовок на первом переходе радиально-ротационного профилирования. 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.

Problems of evaluation of stress field at forming wheel rims from steel cylindrical workpieces at the first transition of radial rotary profiling are considered. The results of theoretical studies make it possible to analyze stresses occurring at deforming process and to determine a set of technological and design parameters of the profiling process, which have a significant impact on the value and distribution of normal and tangential stresses.

Конкурентоспособность продукции колесного производства зависит от уровня изученности технологии радиально-ротационного профилирования, что дает возможность направленного влияния на качество и себестоимость изделий. Для этого необходимо всесторонне теоретически и экспериментально исследовать распределение напряжений и деформаций в заготовке в процессе профилирования, дать научно обоснованные рекомендации производству, обосновать и выявить отдельные технологические параметры или их совокупности, которые оказывают наиболее значимое влияние на ход процесса и полуфабрикат. Такие исследования проводились ранее в работах [1, 2, 3].

Методика расчета компонент напряжений на цилиндрическом участке профиля, представленная в работе [6] достаточно сложна, так как необходимо определять относительные деформации и перемещения участков заготовки в процессе деформирования. Поэтому для упрощения решений воспользуемся уравнениями равновесия для цилиндрической заготовки и уравнением пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений, что

позволит получить решения в напряжениях или внутренних усилиях, как принято в классической теории листовой штамповки.

Переход профилирования и расчетная схема изображены на рис. 1, 2.

Исходим из уравнений равновесия для цилиндрической заготовки, с учетом действующей нагрузки будем иметь [4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial s} &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial s} &= 0, \\ N_y &= R_0 q_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где $q_z = \sum_m \sum_m q \cos \frac{m\pi x}{l} \sin n\varphi$, замечая что $s = R\varphi$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{R_0 \partial \varphi} &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{R_0 \partial \varphi} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$N_y = R_0 q \cos \frac{m\pi x}{l} \sin n\varphi.$$

Придадим уравнениям следующий вид

$$\begin{aligned} N_y &= R_0 q_z, \\ \frac{\partial S}{\partial x} &= -\frac{\partial N_y}{R_0 \partial \varphi}, \\ \frac{\partial N_x}{\partial x} &= -\frac{\partial S_{xy}}{R_0 \partial \varphi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Представим усилия N_x , N_y , S_{xy} так

$$\begin{aligned} N_x &= N_x' + N_x^0, \\ N_y &= N_y' + N_y^0, \\ S_{xy} &= S_{xy}' + S_{xy}^0, \end{aligned}$$

где N_x' , N_y' , S_{xy}' – частное решение системы (3);

N_x^0 , N_y^0 , S_{xy}^0 – общее решение соответственной однородной системы уравнений.

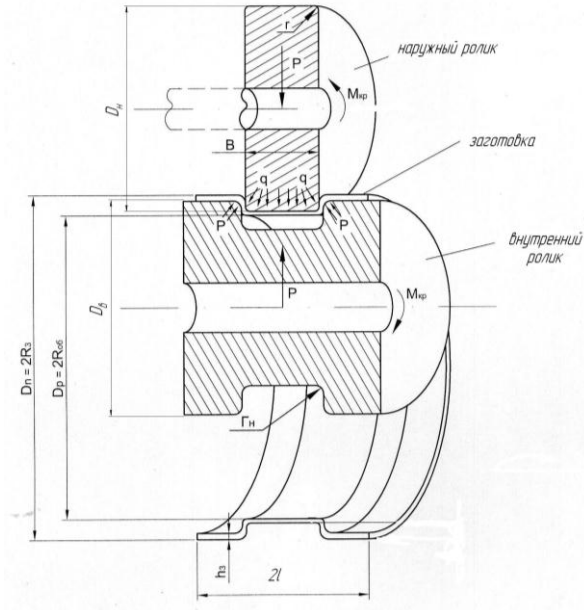


Рисунок 1 – Первый переход радиально ротационного профилирования обода колеса

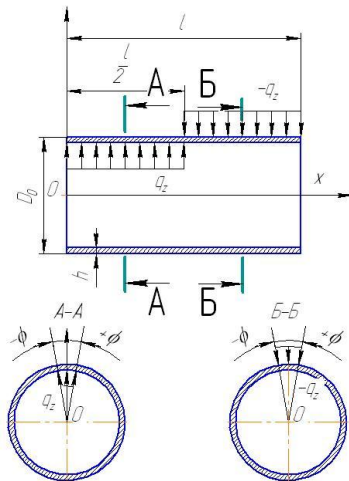


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения компонент тензора напряжений

Частное решение системы находим непосредственно, интегрируя уравнения (3)

$$N_y' = R_0 q_z,$$

$$S_{xy}' = - \int_{x_0}^x \frac{\partial N_y}{R_0 \partial \varphi} dx = - \int_{x_0}^x \frac{\partial R_0 q_z}{R_0 \partial \varphi} dx, \quad (4)$$

$$N_x' = - \int_{x_0}^x \frac{\partial S_{xy}}{R_0 \partial \varphi} dx = \int_{x_0}^x \left(\frac{\partial}{R_0 \partial \varphi} \int_{x_0}^x \frac{\partial R_0 q_z}{R_0 \partial \varphi} \right) dx.$$

Нижний предел зависит от выбора сечения начала отсчета координаты x . Усилия N_x^0 , N_y^0 , S_{xy}^0 получим как общее решение системы (3)

$$N_y = 0,$$

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{R_0 \partial \varphi} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{R_0 \partial \varphi} = 0.$$

Это решение имеет вид:

$$N_y^0 = 0,$$

$$S_{xy}^0 = f_1(\varphi), \quad (6)$$

$$N_x^0 = - \int_{x_0}^x \frac{\partial f_1(\varphi)}{R_0 \partial \varphi} dx + f_2(\varphi).$$

При $x = 0$ на торце заготовки $S_{xy}^0 = 0$ и $N_x^0 = 0$.

Решаем систему (4)

$$S_{xy}' = - \int_{x_0}^x \frac{q_z \cos \frac{m\pi x}{l} \sin n\varphi}{\partial \varphi} dx = - q_z n \frac{l}{m\pi} \sin \frac{m\pi x}{l} \cos n\varphi \Big|_{x_0}^x. \quad (7)$$

При $x_0 = 0$; то $S_{xy}' = 0$, тогда:

$$S_{xy}' = \frac{nl}{m\pi} q_z \sin \frac{m\pi x}{l} \cos n\varphi. \quad (8)$$

$$N_x' = \int_{x_0}^x \left(\frac{n^2 l}{R_0 m \pi} q_z \sin \frac{m \pi x}{l} \cos n \varphi \right) dx = -q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos \frac{m \pi x}{l} \cos n \varphi \Big|_{x_0}^x. \quad (9)$$

При $x_0 = 0$ на торце заготовки

$$N_x' = -q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos n \varphi + q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos \frac{m \pi x}{l} \cos n \varphi \longrightarrow$$

$$N_x' = q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos n \varphi \cdot \left(\cos \frac{m \pi x}{l} - 1 \right) \quad (10)$$

Полное усилие

$$N_x = N_x' + N_x^0 = q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos n \varphi \cdot \left(\cos \frac{m \pi x}{l} - 1 \right). \quad (11)$$

Полученная формула позволяет найти распределение усилий на участке заготовки, где производится раздача, в точке $\frac{l}{2}$ нагрузка изменяет знак на противоположный, поэтому уравнение равновесия для этой точки будет $N_{\frac{l}{2}} = N_{\text{раздачи}} + N_{\text{обжима}}$.

Зависимость для меридионального усилия на участке обжима находим из уравнений (4), изменяя знак поверхностного давления

$$N_x' = -q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos n \varphi \cdot \left(1 - \cos \frac{m \pi x}{l} \right). \quad (12)$$

Окончательно внутреннее усилие на участке обжима будет равно

$$N_x = q_z \frac{n^2 l^2}{R_0 m^2 \pi^2} \cos n \varphi \cdot \left[\left(\cos \frac{m \pi x}{l} - 1 \right) - \left(1 - \cos \frac{m \pi x}{l} \right) \right]. \quad (13)$$

Выразим поверхностную нагрузку q через усилие, действующее со стороны деформирующих роликов

$$q_z = \sum_m \sum_n \frac{P}{\Delta s \Delta x} C_{mn} \cos \frac{m \pi x}{l} \sin n \varphi,$$

где $\Delta s \Delta x$ – величина площадки контакта.

Так как ролик контактирует с заготовкой по всей длине, то $\Delta X = l$, а в окружном направлении только по дуге контакта – $\Delta S = R_0 \sin \varphi_0$, то

$$q = \frac{P}{lR_0 \sin \varphi_0}.$$

Для усилия P воспользуемся формулой Н.В. Потехушина [5] для участка раздачи $P_p = \frac{\pi\varphi_{0B}}{180} R_B h \sigma_s$, тогда $q = \frac{\pi\varphi_{0B}}{180} \cdot \frac{R_B h \sigma_s}{lR_0 \sin \varphi_{0B}}$; и окончательно для q_z будет иметь выражение

$$q_z = \frac{8\pi\varphi_{0B}}{180} \cdot \frac{R_B h \sigma_s}{lR_0 \pi (1 - \pi m)}. \quad (14)$$

где φ_{0B} – угол захвата заготовки внутренним роликом; R_B – радиус внутреннего ролика; h – толщина заготовки; $C_{mm} = \frac{8 \sin \varphi_{0B} n}{\pi n (1 - \pi m)}$ – [6].

Подставляем выражение (14) в (11) и (13), будем иметь:
для участка раздачи

$$N_x = \frac{\varphi_{0B}}{180} \cdot \frac{8\sigma_s R_B h l n^2}{R_0^2 m^2 \pi^2 (1 - \pi m)} \cos n\varphi \cdot \left(\cos \frac{m\pi x}{l} - 1 \right); \quad (15)$$

для участка обжима

$$N_x = \frac{\varphi_{0n}}{180} \cdot \frac{8\sigma_s R_n h l n^2}{R_0^2 m^2 \pi^2 (1 - \pi m)} \cos n\varphi \cdot \left[\left(\cos \frac{m\pi x}{l} - 1 \right) - \left(1 - \cos \frac{m\pi x}{l} \right) \right]. \quad (16)$$

Выводы. Таким образом, установлены зависимости для расчета величины меридиональных внутренних усилий, которые являются наиболее опасными с точки зрения локализации деформаций и выявлены технологические и конструкторские факторы, оказывающие влияние на распределение этих усилий по образующей профиля. Тангенциальные внутренние усилия можно найти из условия пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений для плоского напряженного состояния. Снижать величину растягивающих напряжений можно увеличивая диаметр заготовки и уменьшая диаметры деформирующего инструмента.

Список использованных источников: 1. Потехушин Н.В. Исследование напряжений при радиальном профилировании заготовок на первых переходах / Н.В. Потехушин, Э.З. Сайфулин. – В кн.: Обработка металлов давлением. Свердловск, УПИ.– 1974. – вып. 2. – С. 111-114. 2. Коноваленко А.Д. Исследование усилий при изготовлении широкопрофильных ободьев колес / А.Д. Коноваленко // Математичні проблеми технічної механіки: Тез. допов. другої Всеукраїн. наук. конф. – Дніпрозержинськ: ДДТУ, 2002. – С. 70. 3. Чисиринский 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. **4.** *Филин А.П.* Элементы теории оболочек / *А.П. Филин.* – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. – 256 с. **5.** *Потекушин Н.В.* Оптимизация процесса профилирования ободьев / *Н.В. Потекушин, И.И. Чемерис* // Автомобильная промышленность. – 1978. – №5. – С. 33-36. **6.** *Драгобецкий В.В.* Анализ методов интенсификации процессов вытяжки и профилирования листового материала с целью их применения в операциях радиально-ротационного профилирования замкнутых оболочек для совершенствования технологий колесного производства / *В.В. Драгобецкий, Р.Г. Пузырь, Т.В. Гайкова, Р.Г. Аргат* // Технологические системы. Научно-технический журнал. – Киев: ООО «Компания Индустриальные технологии». – 2014. – №3 (68). – С. 56-61.

Bibliography (transliterated): 1. Potekushin N.V. Issledovanie naprjazhenij pri radial'nom profilirovanii zagotovok na pervyh perehodah / N.V. Potekushin, Je.Z. Sajfulin. – V kn.: Obrabotka metallov davleniem. Sverdlovsk, UPI.– 1974. – vyp. 2. – S. 111-114. 2. Konovalenko A.D. Issledovanie usilij pri izgotovlenii širokoprofil'nyh obod'ev koles / A.D. Konovalenko // Matematichni problemi tehničnoj mehaniki: Tez. dopov. drugoj Vseukraïn. nauk. konf. – Dniprodzerzhinsk: DDTU, 2002. – S. 70. 3. Chigirinskij V.V. Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnyh sredstv i sel'skohozjajstvennoj tehnik: [Monografija] / V.V. Chigirinskij, V.L. Mazur, S.V. Belikov i dr. – Dnepropetrovsk: RIA «Dnepr-VAL», 2010. – 309 s. 4. Filin A.P. Jelementy teorii oboloček / A.P. Filin. – L.: Strojizdat, Leningr. otd-nie, 1975. – 256 s. 5. Potekushin N.V. Optimizacija processa profilirovanija obod'ev / N.V. Potekushin, I.I. Chemeris // Avtomobil'naja promyshlennost'. – 1978. – №5. – S. 33-36. 6. Dragobeckij V.V. Analiz metodov intensivizacii processov vytjazhki i profilirovanija listovogo materiala s cel'ju ih primenenija v operacijah radial'no-rotacionnogo profilirovanija zamknutyh oboloček dlja sovershenstvovaniya tehnologij kolesnogo proizvodstva / V.V. Dragobeckij, R.G. Puzyr', T.V. Gajkova, R.G. Argat // Tehnologicheskie sistemy. Nauchno-tehnicheskij zhurnal. – Kiev: ООО «Kompanija Industrial'nye tehnologii». – 2014. – №3 (68). – S. 56-61.