

УДК 621.7.044

Пузырь Р. Г.

РАСЧЕТ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА ВТОРОМ ПЕРЕХОДЕ РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Сложность теоретического анализа радиально-ротационного профилирования (РРП) ободьев колес отмечается многими авторами исследований по данной тематике [1–4] и на данный момент отсутствуют четкие рекомендации для определения основных показателей напряженно-деформированного состояния с учетом локальности очага деформации. После первого перехода профилирования полуфабрикат приобретает ступенчатую форму со сформировавшимися посадочными полками и намеченными бортовыми закраинами. Вторым переход РРП предназначен для предварительного получения центрального ручья, окончательного формирования посадочных полок и дальнейшей раздачи краевых элементов полуфабриката для оформления боковых закраин на последнем переходе. Форма обечайки после данного этапа деформирования для различных видов ободьев будет несколько отличаться от предложенной в дальнейшем анализе в зависимости от требуемой конструкторами формы и размеров бортовой закраины.

Целью работы является определение компонент тензора напряжений на втором переходе РРП с учетом деформирования периферийных зон, лежащих за очагом деформации, что даст возможность в дальнейших исследованиях получить необходимую информацию для совершенствования операций профилирования ободьев колес.

На данном этапе зона центрального ручья подвергается обжиму с формированием радиусных переходов от центрального ручья к стенкам монтажных полок, зона монтажных полок окончательно определяется раздачей, получая небольшую конусность 10–12°, и формируются радиусные переходы от монтажных полок к боковым закраинам. Зоны боковых закраин испытывают растягивающие деформации в тангенциальном направлении путем раздачи, т.е. все участки профиля полуфабриката деформируются пластически, но каждый из них с разной степенью деформации. Степень деформации каждого участка профиля зависит от размеров полуфабриката на предыдущем переходе РРП и от геометрических размеров рабочего инструмента – профилирующих роликов.

Рассечем полуфабрикат сечениями на простые поверхности и рассмотрим напряженное состояние каждого геометрического тела. Начнем расчет с боковых закраин. Будем рассматривать установившуюся фазу деформирования, когда элементы закраин контактируют с внутренним роликом (рис. 1).

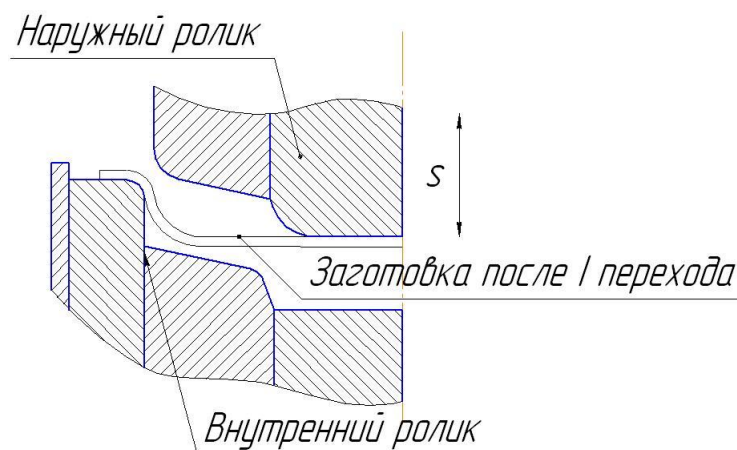


Рис. 1. Положение заготовки в начале процесса деформирования на втором переходе РРП

При включении подачи вращающиеся ролики сближаются, и наружный ролик при соприкосновении с заготовкой увлекает последнюю в очаг деформации, начиная формировать центральный ручей, одновременно внутренний ролик раздвигает краевые участки закраин. Принимаем, что до начала деформации зоны закраин имели форму цилиндрической поверхности, тогда к этим участкам можно применить формулы для расчета напряжений для первого перехода РПП [5]. Для возникающих внутренних меридиональных усилий имеем

$$N_{xppраз} = \frac{4\phi_{0в}}{90} \frac{R_г \sigma_s n l h}{R_{нб}^2 m^3 \pi^3} \cos n\phi \sin \frac{m\pi x}{l}, \quad (1)$$

где $R_{нб}$ – радиус наметок боковых закраин; h – толщина заготовки; σ_s – предел текучести металла заготовки; ϕ – окружная координата; x – координата вдоль оси заготовки; $R_г$ – радиус внутреннего ролика, прилегающий к бортовой закраине; l – длина наметки бортовой закраины на участке деформирования; $\phi_{0в}$ – угол захвата внутренним роликом заготовки; m , n – члены ряда, принимающие значения – $m = 2...4$; $n = 1...3$.

Элементы бортовой закраины в процессе деформации постепенно втягиваются на радиус закругления внутреннего ролика и изгибаются, в свою очередь, ранее изогнутые элементы наметки бортовой закраины разгибаются и переходят в стенку, которая сопрягает бортовую закраину с посадочной полкой.

На этом участке элементы обода получают деформации растяжения в тангенциальном и меридиональном направлении. Для отыскания величины действующих напряжений на радиусе закругления внутреннего ролика, рассмотрим установившуюся фазу деформирования (рис. 2) и воспользуемся решениями для торообразной поверхности, полученными в ранних исследованиях [6].

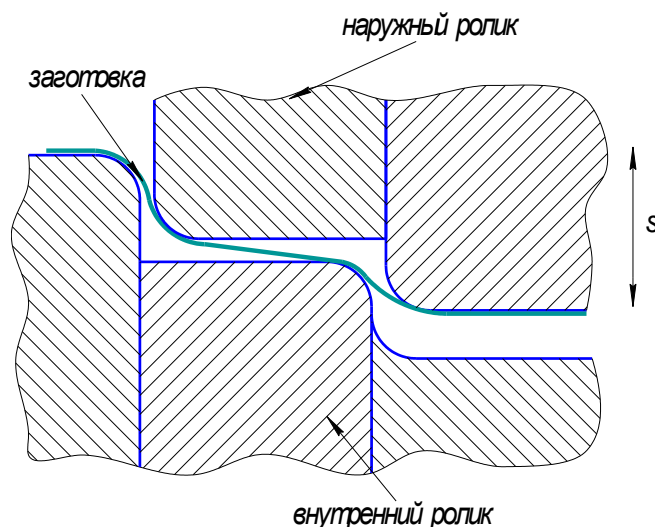


Рис. 2. Установившаяся фаза деформирования на втором переходе радиально-ротационного профилирования

Учитывая граничные условия, при которых меридиональные напряжения должны быть равны на границе цилиндрического и торообразного участков получим:

$$N_{xppрадиу закраин} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}} + \frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}} \right) N_{xppраз} \right] \cos \phi, \quad (2)$$

$$S_{xppрадиу закраин} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_1}} - \frac{e^{-B}}{2e^{-B_1}} \right) N_{xppраз} \right] \sin \phi. \quad (3)$$

где θ и ϕ – криволинейные координаты, под θ понимается полярный угол в плоскости меридиана, под ϕ – угол в плоскости параллельного круга;

$$A = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2k}{2} (4k+1); B = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2k}{2} (4k+3); k = \frac{a}{R}; a - \text{радиус}$$

закругления ролика; R – радиус ролика; A, B – значения A и B после подстановки граничных условий.

Элементы стенки полки в процессе деформирования постепенно переходят в радиус закругления от стенки к посадочной полке и получают некоторую кривизну, на выходе из этого участка они разгибаются. Для данного участка принимаем решения, полученные выше, тогда в пластической области меридиональные и касательные усилия будут равны

$$N_{\text{радиус стенки полки}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_2}} + \frac{e^{-B}}{2e^{-B_2}} \right) N_{\text{радиус закраин}} \right] \cos \varphi. \quad (4)$$

$$S_{\text{радиус стенки полки}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_2}} - \frac{e^{-B}}{2e^{-B_2}} \right) N_{\text{радиус закраин}} \right] \sin \varphi. \quad (5)$$

где A_2, B_2 – постоянные коэффициенты, зависящие от показателя k , который, в свою очередь, зависит от геометрических параметров данного участка.

Далее формообразование затрагивает прямолинейный участок – посадочную полку, последняя получает деформацию растяжения в тангенциальном и меридиональном направлении. Формирование посадочных полок происходит на втором переходе радиально-ротационного профилирования за счет раздачи полуфабриката и образования некоторой конусности 10–12°.

Отделив этот участок от других поверхностей получим поверхность усеченного конуса, которая формируется раздачей левой стороны, при этом правая сторона полок может не испытывать деформации растяжения в тангенциальном направлении, а в некоторых случаях подвергается обжиму. Это зависит от соотношения диаметров деформирующих роликов. Для упрощения анализа распределения напряжений в очаге деформации принимаем, что все элементы посадочной полки испытывают раздачу. Учитывая граничные условия, выражение для N_x будет выглядеть следующим образом, которое сходные с [7]

$$N_{\text{полки}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-2A}}{4e^{-2A_2}} + \frac{e^{-2B}}{4e^{-2B_2}} \right) N_{\text{радиус закраин}} \cos n\varphi \right] \times \\ \times \left(\frac{n}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{l^2}{yl_1} = \frac{l}{l_1} \right) + 1 \right) + \left(\frac{l^2}{yl_1} - \frac{l}{l_1} \right) \frac{4\alpha_6 R_6}{90^\circ R_n} \frac{h^2}{l_1 m \pi} \frac{\sigma_S}{\sin \alpha} \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\varphi. \quad (6)$$

где R_6, R_n – радиусы внутреннего ролика на участке полки и полуфабриката на этом же участке до деформации; l – длина полного конуса; l_1 – длина конусного участка посадочной полки; α – угол конусности; y – координата в меридиональном направлении.

Как видно из полученной формулы, меридиональные напряжения будут зависеть от граничных условий (первое слагаемое) и от величины внешней нагрузки (второе слагаемое). Для их уменьшения необходимо увеличивать длину монтажной полки и угол конусности, а также уменьшать радиус внутреннего деформирующего ролика.

Для анализа распределения напряжений на следующем участке профиля полуфабриката – радиусе закругления сопряжения посадочной полки с монтажным ручьем – используем уравнения равновесия для тора и их решение, показанное выше. Здесь необходимо учесть тот факт, что внешнее давление меняет знак на противоположный, так как на этом участке начинается обжим заготовки

$$N_{\text{радиус полки и стенки}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_3}} + \frac{e^{-B}}{2e^{-B_3}} \right) N_{\text{полки}} \right] \cos \varphi, \quad (7)$$

$$S_{\text{радиус полки и стенки}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_3}} - \frac{e^{-B}}{2e^{-B_3}} \right) N_{\text{хполки}} \right] \sin \varphi, \quad (8)$$

где A_3, B_3 – постоянные коэффициенты, зависящие от показателя k , который в свою очередь зависит от геометрических параметров данного участка (отношения радиуса закругления ролика к его радиусу).

Следующий торобразный участок – это сопряжение стенки монтажного ручья с монтажным ручьем (рис. 2). Здесь элементы полуфабриката получают деформации растяжения в меридиональном направлении и деформации сжатия в тангенциальном, так как происходит обжим зоны центрального ручья. Для данного сопряжения решения будут аналогичны, полученным ранее, но только с новыми коэффициентами A_4 и B_4 .

$$N_{\text{радиус монтажного ручья}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_4}} + \frac{e^{-B}}{2e^{-B_4}} \right) N_{\text{радиус полки и стенки}} \right] \cos \varphi, \quad (9)$$

$$S_{\text{радиус монтажного ручья}} = \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_4}} - \frac{e^{-B}}{2e^{-B_4}} \right) N_{\text{радиус полки и стенки}} \right] \sin \varphi. \quad (10)$$

Зона центрального ручья в процессе деформирования сжимается в тангенциальном направлении и растягивается в меридиональном. Для определения компонент тензора напряжений для этого участка исходим из уравнений равновесия для цилиндрической заготовки [5], для которых решение имеет вид

$$\begin{aligned} N_{\text{хобж}} = & -\frac{4\varphi_{0н}}{90} \cdot \frac{R_n h n l \sigma_s}{R_{0ц}^2 m^3 \pi^3} \sin \frac{\pi x}{l} \cos n\varphi + \\ & + \left[-\frac{nx}{R_0} \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_4}} - \frac{e^{-B}}{2e^{-B_4}} \right) + 2 \left(\frac{e^{-A}}{2e^{-A_4}} + \frac{e^{-B}}{2e^{-B_4}} \right) \right] \times \\ & \times \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \cos n\varphi \cdot N_{\text{радиус полки и стенки}}. \end{aligned} \quad (11)$$

где $R_{0ц}$ – начальный радиус зоны центрального ручья; l – половина ширины центрального ручья.

ВЫВОДЫ

Таким образом, теоретический анализ второго перехода процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес транспортных средств показал, что в установленном режиме деформирования все участки профиля обода получают пластические деформации: участки боковых краев и посадочных полок – деформации растяжения в тангенциальном и меридиональном направлении, участок центрального ручья – деформации сжатия в тангенциальном направлении и растяжения в меридиональном. Меридиональные напряжения нарастают монотонно от торца заготовки к центральному ручью, увеличиваясь в более чем в 2 раза на каждом радиусе сопряжения поверхностей. В местах смены знака поверхностной нагрузки происходит скачкообразное увеличение меридиональных внутренних усилий, что согласуется с теорией сопротивления материалов, когда в месте приложения нагрузки внутренние усилия изменяются скачком на величину приложенных сил.

Полученные решения позволяют определять величину компонент тензора напряжений на любом участке профиля обода колеса во время деформирования, как в области пластических деформаций, так и в упругой зоне. Как показывает анализ построенных решений, величина опасных растягивающих меридиональных внутренних усилий имеет прямую зависимость от граничных условий в точках сопряжения поверхностей, т.е. от уровня напряжений на предыдущем отрезке профиля, что, в свою очередь, дает возможность управлять по-

лем напряжений на данном участке, изменяя граничные условия на торце исследуемой поверхности. Наиболее чувствительны к изменению граничных условий выражения, которые определяют уровень напряжений на радиусах закругления профиля (2, 3), (4, 5), (7, 8), (9, 10), так как в этих формулах постоянная интегрирования выступает в роли множителя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. 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.
- 2 Коноваленко А.Д. Исследование усилий при изготовлении широкопрофильных ободьев колес / А. Д. Коноваленко // *Математичні проблеми технічної механіки: Тез. допов. другої Всеукраїн. наук. конф. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2002. – С. 70.*
4. Драгобецкий В.В. Учет влияния изменения толщины листовой заготовки в процессе деформирования / В.В. Драгобецкий, А.А. Зюков, А.Д. Коноваленко // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005 – Вип. 2 (31). – С. 61–62.*
5. Пузырь Р.Г. Расчет меридиональных напряжений, возникающих на первом переходе процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес / Р.Г. Пузырь, О.Я. Мовшович // *Научно-технический и производственный журнал «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением», 2013. – Вып. № 10. – С. 3–7.*
6. Пузырь Р.Г. Анализ распределения напряжений при радиально-ротационном профилировании ободьев колес / Р.Г. Пузырь // *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – Вип. 28. – С. 86–90.*
7. 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. – Вип. 3(92). – Ч. 1. – С. 67–73.*

REFERENCES

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. Chigirinskij V.V. Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnyh sredstv i sel'skhozajstvennoj tehniki: [Monografija] / V.V. Chigirinskij, V.L. Mazur, S.V. Belikov [i dr.] – Dnepropetrovsk: RIA «Dnepr-VAL», 2010. – 309 s.
- 2 Konovalenko A.D. Issledovanie usilij pri izgotovlenii shirokoprofil'nyh obod'ev koles / A. D. Konovalenko // *Matematichni problemi tehnicnoi mehaniki: Tез. dopov. drugoi Vseukrain. nauk. konf. – Dniprodzerzhins'k: DDTU, 2002. – S. 70.*
4. Dragobeckij V.V. Uchet vlijaniya izmenenija tolshhiny listovoj zagotovki v processe deformirovanija / V.V. Dragobeckij, A.A. Zjukov, A.D. Konovalenko // *Visnik Kremenčuc'kogo derzhavnogo politehničnogo universitetu: Naukovi praci KDPU. – Kremenčuk: KDPU, 2005 – Vip. 2 (31). – S. 61–62.*
5. Puzyr' R.G. Raschet meridional'nyh naprjazhenij, vznikajushih na pervom perehode processa radial'no-rotacionnogo profilirovanija obod'ev koles / R.G. Puzyr', O.Ja. Movshovich // *Nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Kuznečno-shtampovočnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem», 2013. – Vyp. № 10. – S. 3–7.*
6. Puzyr' R.G. Analiz raspredelenija naprjazhenij pri radial'no-rotacionnom profilirovanii obo-d'ev koles / R.G. Puzyr' // *Zbirnik naukovih prac' Kirovograds'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu / Tehnika v sil's'kogospodars'komu virobničtvi, galuzeve mashinobuduvannja, avtomatizacija. – Kirovograd: KNTU, 2015. – Vip. 28. – S. 86–90.*
7. Raspredelenie naprjazhenij na koničeskom uchastke profilja polufabrikata pervogo perehoda radial'no-rotacionnogo profilirovanija / R.G. Puzyr', O.N. Dolgih, B.S. Gricenko, L.Je. Dikaja // *Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo. – Kremenčuk: KrNU, 2015. – Vip. 3(92). – Ch. 1. – S. 67–73.*

Пузырь Р. Г. – канд. техн. наук, доц. КрНУ

КрНУ – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: puzyruslan@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24.03.2016 г.