

УДК 621.7.044

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ ПРОФИЛЯ ПОЛУФАБРИКАТА ПЕРВОГО ПЕРЕХОДА РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих, Б. С. Гриценко, Л. Э. Дикая

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: puzyruslan@gmail.com

Рассматриваются некоторые вопросы определения компонент тензора напряжений при радиально-ротационном способе получения ободьев колес транспортных средств. Показано, что для более точного определения величины возникающих напряжений необходимо исходить из уравнений равновесия оболочек вращения, используя гипотезы и допущения технической теории оболочек и пластин. Приводятся зависимости для расчета внутренних усилий на коническом участке профиля полуфабриката на первом переходе радиально-ротационного профилирования и сравнение результатов при профилировании из цилиндрической заготовки и конического полуфабриката. Теоретическим анализом выявлено, что применение предварительно деформированных раздачей заготовок позволяет уменьшить величину опасных меридиональных напряжений почти в два раза на первом переходе получения профиля обода по сравнению с цилиндрическими и таким образом снизить утонение металла в радиусных зонах полуфабриката.

**Ключевые слова:** профиль, обод, деформация, полуфабрикат, цилиндр.

## РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ НА КОНІЧНІЙ ДІЛЯНЦІ ПРОФІЛЮ НАПІВФАБРИКАТУ ПЕРШОГО ПЕРЕХОДУ РАДІАЛЬНО-РОТАЦІЙНОГО ПРОФІЛЮВАННЯ

Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих, Б. С. Гриценко, Л. Э. Дика

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: puzyruslan@gmail.com

Розглядаються деякі питання визначення компонент тензора напружень при радіально-ротацийному способі отримання ободів коліс транспортних засобів. Показано, що для більш точного визначення величини виникаючих напружень необхідно виходити з рівнянь рівноваги оболонок обертання, використовуючи гіпотези і допущення технічної теорії оболонок і пластин. Наведено залежності для розрахунку внутрішніх зусиль на конічній ділянці профілю напівфабрикату на першому переході радіально-ротацийного профілювання і порівняння результатів при профілюванні із циліндричної заготовки і конічного напівфабрикату. Теоретичним аналізом виявлено, що застосування попередньо деформованих роздачею заготовок дозволяє зменшити величину небезпечних меридіональних напружень майже в два рази на першому переході отримання профілю обода порівняно з циліндричними і таким чином знизити стоншення металу в радіусних зонах напівфабрикату.

**Ключові слова:** профіль, обід, деформація, напівфабрикат, цилиндр.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В технологии изготовления ободьев стальных колес используют перед первым переходом профилирования раздачу цилиндрической заготовки с двух сторон. При этом образуются конические поверхности, которые сопрягаются с цилиндрическими. Этот полуфабрикат является заготовкой для первого перехода радиально-ротационного профилирования (РРП) (рис. 1, 2).

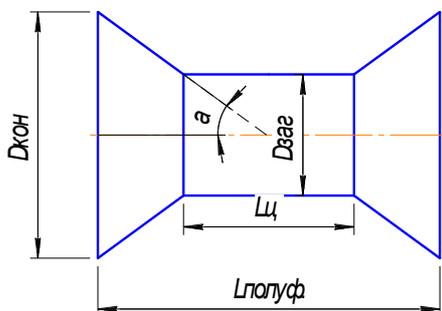


Рисунок 1 – Полуфабрикат для первого перехода РРП

Раздача цилиндрической заготовки проводится с целью приближения формы полуфабриката к готовому профилю после первого перехода. При этом удастся уменьшить разнотолщинность обода и снизить металлоемкость колес.

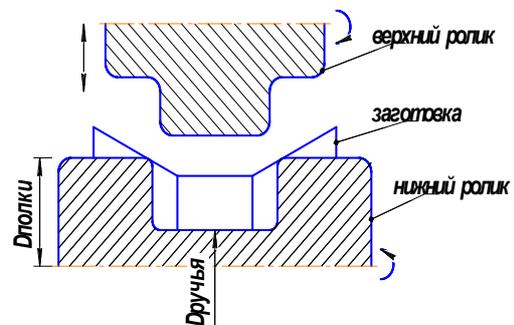


Рисунок 2 – Первый переход РРП

Вопросы раздачи цилиндрических заготовок широко освещены в литературе [1–4] и в данном исследовании не рассматриваются.

На данный момент имеется достаточное количество исследований по определению влияния геометрических характеристик заготовки и инструмента, механических характеристик металла, анизотропии, технологических факторов на напряженно-деформированное состояние, качество готового обода и энергосиловые параметры процесса радиально-ротационного профилирования [5, 6]. Установлено, что наиболее опасными являются нарастающие на каждом переходе растягивающие меридиональные напряжения, которые приводят к разрывам металла в тангенциальном направлении на площадке контак-

та и недопустимым утонением в местах радиусных переходов. Сформированы рекомендации для проектирования рациональных технологических процессов с точки зрения экономии металла. На основе проведенных исследований предлагаются пути интенсификации. Однако отсутствие аналитических зависимостей, регрессионных моделей процесса не позволяет в явном виде установить связь между геометрическими характеристиками очага деформации и технологическими факторами с усилием профилирования, нарастающими меридианальными напряжениями и радиальной деформацией, приводящей к утонению стенки в опасном сечении. Это никак не уменьшает значения проведенных исследований, а наоборот, позволит, опираясь на полученные данные и применяя конечно-элементное моделирование, создать регрессионные модели процесса радиально-ротационного профилирования, тем самым выявить наиболее значимые факторы переходов.

Целью работы является реализация математической модели процесса радиально-ротационного профилирования инженерным методом для определения компонент тензора напряжений на коническом участке профиля полуфабриката.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Заготовка устанавливается на нижний профилирующий ролик первого перехода коническими поверхностями на радиусы закругления, затем прижимается верхним роликом, при этом ролики вращаются в разные стороны, увлекая заготовку в очаг деформации.

Напряженное состояние элементов заготовки при деформировании из подготовленного раздачи полуфабриката будет отличаться от напряженного состояния заготовки при профилировании из традиционной цилиндрической обечайки.

Методы получения ободьев колес из цилиндрической обечайки не имеют аналогов в обработке металлов давлением, потому что они включают одновременную изменчивость операций в одном переходе, аналогичных изгибу листа, вытяжке с утонением, обкатке (прокатке) отдельных элементов, отбортовке и т.д. Причем на разных стадиях процесса комбинации от различных воздействий на деформируемую заготовку изменяются [7, 8]. При решении задачи напряженно-деформированного состояния при радиально-ротационном профилировании необходимо учитывать многовариантность комбинаций действия инструмента на заготовку. Дополнительные сложности возникают и от того, что в процессе профилирования приходится иметь дело с деформацией цилиндрической оболочки, причем в промежуточных переходах (при образовании многоступенчатых ручьев с боковыми стенками) сопротивление деформации, например, в меридиональном направлении, значительно возрастает по сравнению с сопротивлением деформации цилиндрической обечайки.

При решении задачи напряженно-деформированного состояния учитываются следующие особенности процесса радиально-ротационного профилирования:

1. В процессе профилирования имеют место упругие и пластические деформации:

- а) гибка с утонением в угловых зонах;
- б) вытяжка элементов в меридиональном направлении;
- в) сжатие элементов в тангенциальном направлении при образовании центральных ручьев и растяжение – при образовании закраин;
- г) сжатие элементов при холодной прокатке посадочных полок.

2. Особенно опасными с точки зрения появления трещин и разрывов являются внешние (относительно действия роликов) слои угловых зон профиля, которые подвергаются не только растяжению в результате изгиба, но также и вытяжке.

3. Многократное действие в разных переходах инструмента (роликов) на одни и те же угловые зоны при профилировании по существующим технологическим схемам создает значительное упрочнение металла в этих зонах.

4. Особенности процесса, налагаемые различными технологическими схемами построения переходов:

- а) осадка с раздачей, формирование центрального ручья, формирование бортовых закраин в условиях утонения угловых зон;
- б) осадка с раздачей, формирование центрального ручья конусообразным роликом в первом переходе с перемещением угловых зон от центра к периферии в последующих переходах, формирование закраин;
- в) осадка с раздачей, формирования угловых зон роликами, имеющими знакопеременную кривизну;
- г) формирование угловых зон за счет выравнивания ложных канавок с обратной выпуклостью (технологических гофров);
- д) формирование центрального ручья с обечайки уменьшенного диаметра с одновременным формированием зон радиусов закраин;
- е) формирование профиля в условиях прижатых посадочных полок;
- ж) профилирование с предыдущим набором материала.

5. Небольшая длина очага деформации позволяет приближать процесс к процессу гибки и гибки с вытяжкой листовой заготовки.

Анализ формы и размеров заготовки для профилирования колес в работах [5–7] показал, что она представляет собой фактически симметричную тонкостенную оболочку, имеет форму тела вращения, поэтому при ее расчете авторами были сделаны следующие допущения:

- а) нормальные напряжения на участках, параллельных срединной поверхности, пренебрежимо малы по сравнению с другими компонентами напряжений, и ими можно пренебречь в уравнениях связи и условиях пластичности;
- б) совокупность точек, находящихся на нормали, проведенной к срединной поверхности до деформации, образует после деформации прямую, нормальную к деформированной срединной поверхности;
- в) нормальные напряжения в нормальных сечениях оболочки распределяются равномерно по ее толщине, т.е. пренебрегают сгибающими моментами, действующими в сечениях оболочки.

В роботах [5, 6] представлений підхід для визначення величини нормальних напружень, дійсуючих в очаге деформації, оснований на вирішенні рівнянь рівноваги для осесиметричного деформування. В цьому випадку спочатку проводиться аналіз схем напружень і деформацій при профілюванні і приймаються наступні допущення (рис. 3):

- профілювання в миттєвний момент часу представляє собою процес зосередженого вдавлювання в плоску заготовку фігурного штампa, вызиваючий таке ж напружено-деформоване стан, як і реальний процес профілювання;

- процес, при якому основні закони пластичності в межах практично допустимої точності не втрачають своєї сили, приймається приблизно монотонним на кожній технологічській операції.

- інтенсивність і характер формозмінення в очаге деформації залежить в основному від геометрії інструмента і розмірів заготовки як найбільш активних факторів;

- при достаточній продовжителі обробки характер напружено-деформованого стану не змінюється, залишаючись симетричним відносно осі заготовки.

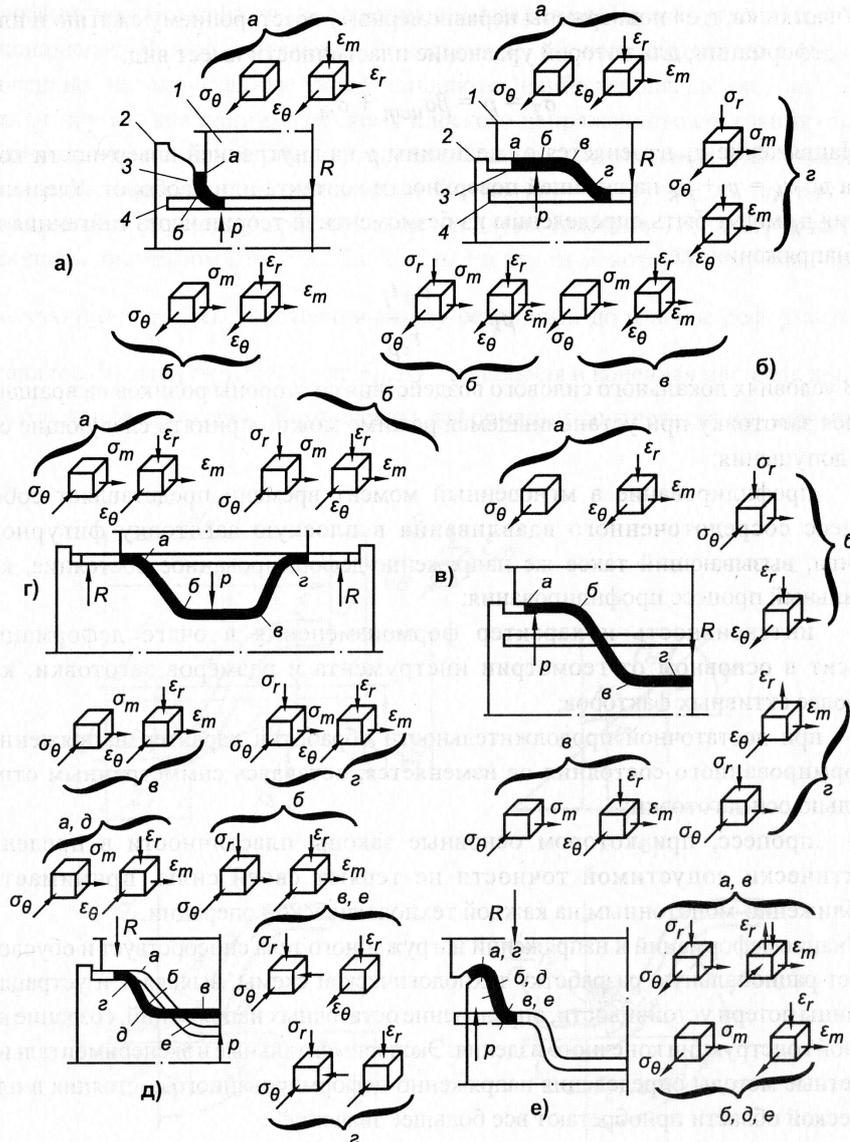


Рисунок 3 – Механічні схеми деформацій і напружень при різних видах кінцевого формозмінення: а – отбортовка; б – раздача; в – раздача з обжимом; г – обжим; д – обжим і раздача з підпором; е – раздача, отбортовка з закаткою

Для нахилного участка компоненти напружень виражені формулами

$$\sigma_m = \frac{\alpha_1 \sigma_\theta \cos \alpha_1}{\cos^2 \alpha} \left( 1 - \frac{Y_{cp}}{R_{cp}} \right) + \frac{p_x (1 - f \operatorname{ctg} \alpha)}{t_i \cos \alpha} Y_{cp}^2 \ln \frac{R_{cp}}{Y_{cp}}$$

$$\sigma_m = \frac{\alpha_1 \sigma_\theta \cos \alpha_1}{\cos^2 \alpha} \left( 1 - \frac{Y_{cp}}{R_{cp}} \right) + \frac{p_x (1 - f \operatorname{ctg} \alpha)}{t_i \cos \alpha} Y_{cp}^2 \ln \frac{R_{cp}}{Y_{cp}},$$

$$p_x = \beta \sigma_s \frac{t_i (\cos^2 \alpha \sin \alpha_1 - \sin^2 \alpha \cos \alpha_1)}{\alpha_1 (b + x \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha + t_i (\cos^2 \alpha \sin \alpha_1 - \sin^2 \alpha \cos \alpha_1)},$$

где  $p_x$  – удельное усилие деформирования;  $Y_{cp}$  – усредненная координата наклонной полки;  $R_{cp}$  – средний радиус наклонного участка;  $\alpha$  – угол наклона участка;  $al$  – длина контактного участка в тангенциальном направлении.

Из представленного обзора по аналитическому определению поля напряжений и деформаций при радиально-ротационном профилировании ободьев колес следует, что по данному вопросу имеется небольшое количество исследований, в основном направленных на решение уравнений равновесия участка заготовки совместно с условием пластичности и неразрывности деформаций. Напряженное состояние принимается плоским с осевой симметрией, что значительно упрощает математические трудности интегрирования уравнений равновесия и обеспечивает достаточно точное и простое решение. В действительности же процесс деформирования заготовки обода колеса представляет собой вариант локального нагружения в каждый последующий момент времени участка (2–4 % боковой поверхности) замкнутой оболочки вращения. Для более точного описания напряженно-деформированного состояния в процессе деформации необходимо учитывать изгибающие моменты, возникающие в местах приложения усилий, что невозможно без привлечения теории оболочек вращения. Это уточнит полученные ранее решения и поможет более широко раскрыть суть явлений, происходящих в очаге деформации и за его пределами. В то же время следует обратить внимание и на более простые варианты теорий, таких как теория деформирования балок и безмоментная теория оболочек вращения, с помощью которых возможно получение упрощенных вариантов решения поставленной задачи.

Для определения напряжений на первой операции радиально-ротационного профилирования в коническом участке принимали следующие допущения: материал заготовки принимался как идеальный упругопластический, изотропный; гипотезы Киргоффа-Лява, которые сводят деформацию оболочки к деформации ее срединной поверхности; связь между напряжениями и деформациями по деформационной теории пластичности; условие пластичности для плоского напряженного состояния по гипотезе максимальных касательных напряжений; толщина металла не изменяется в процессе деформации; очаг деформации рассматривался в установившемся статическом режиме; не учитывается трение между вращающимися роликами и заготовкой и изгибающие моменты, действующие в меридиональном и тангенциальном направлении; принимается, что заготовка пластически деформируется только в области действия инструмента, остальная часть заготовки деформируется упруго. При этом в очаге деформации материал заготовки – жесткопластический, за его пределами – упругий, подчиняющийся закону Гука.

Для определения компонент тензора напряжений исходили из общих уравнений равновесия безмоментной теории оболочек вращения, положив в них коэффициенты первой квадратичной

формы  $a_{11} = A_1^2$  и  $a_{22} = A_2^2$ ; здесь  $R_1 = \infty$ , для элемента меридиана можно записать

$$dy = R_1 d\varphi \rightarrow \frac{d}{d\varphi} = R_1 \frac{d\varphi}{d\varphi}$$

Кроме того, имеем:  $r_o = y \sin \alpha$ ;  $dr_o/dy = \sin \alpha$ ;  $R_2 = y \operatorname{tg} \alpha$  [9] (рис. 3).

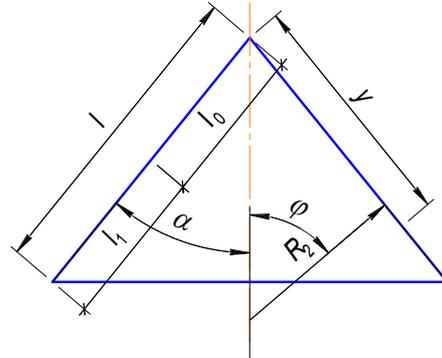


Рисунок 3 – Пояснения к расчету напряжений при деформировании конической поверхности

Рассекаем сложную поверхность сечениями для получения простых геометрических тел вращения, и для каждой из них составляем уравнения равновесия. Окончательно для конического участка уравнения равновесия элемента полуфабриката будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial y} + \frac{N_1}{y} + \frac{1}{y \sin \alpha} \cdot \frac{\partial S}{\partial \theta} &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{2S}{y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N_1$  – меридиональные усилия;  $S$  – касательные усилия;  $\theta$  – координата, отсчитываемая в окружном направлении.

Интегрируя второе уравнение системы, получим

$$S = -\frac{C_1^2}{y^2}, \quad (2)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования.

Граничные условия: на краю оболочки, где  $y=l$ , отсутствуют меридиональные напряжения  $\sigma_x = 0 = N_1$ , но  $S = h q_z \sin n\theta$  тогда

$$C_1^2 = h l^2 q_z \sin n\theta, \quad (3)$$

подставляя выражение (3) в (2) и, проведя несложные преобразования, получим окончательно

$$S = \frac{h l^2 q_z \sin n\theta}{y^2}, \quad (4)$$

где  $h$  – толщина заготовки;  $q_z$  – поверхностная нагрузка.

Полученный результат подставляем в первое уравнение системы (1)

$$\frac{\partial N_1}{\partial y} + \frac{N_1}{y} = -\left( n \frac{h l^2 q_z}{y^3 \sin \alpha} \right) \cos n\theta. \quad (5)$$

Интегрируя данное уравнение, положив, что  $N_1 = UV$ , получим

$$N_1 = \frac{nhl^2 q_z \cos n\theta}{y^2 \sin \alpha} + \frac{C_2}{y}. \quad (6)$$

Постоянную  $C_2$  находим из граничных условий: при  $y=l; N_1=0$ , так как усилия на торце отсутствуют

$$C_2 = -n \frac{hl^2 q_z \cos n\theta}{\sin \alpha}. \quad (7)$$

Тогда выражение для меридионального усилия будет иметь вид

$$N_1 = \frac{nhq_z \cos n\theta}{\sin \alpha} \frac{l}{y} \left( \frac{l}{y} - 1 \right). \quad (8)$$

Полученная формула пригодна для расчетов напряжений, возникающих в полном конусе. Для того чтобы ее можно было использовать при расчетах усеченного конуса (рис. 1), нужно изменить пределы интегрирования [6] для функции  $U$  – см. выше – ( $N_1 = UV$ ):

– для полного конуса:

$$N_1 = \frac{nhl^2 q_z \cos n\theta}{y \sin \alpha} \Big|_0^l = \frac{nhl q_z \cos n\theta}{\sin \alpha} - \infty -$$

знак бесконечность означает, что в вершине конуса меридиональное усилие будет равно бесконечности [10–12];

– для усеченного конуса:

$$N_1 = \frac{nhl^2 q_z \cos n\theta}{y \sin \alpha} \Big|_{l_1}^l = \frac{nhl q_z \cos n\theta}{\sin \alpha} - \frac{nhl^2 q_z \cos n\theta}{l_1 \sin \alpha} = \frac{nhl q_z \cos n\theta}{\sin \alpha} \left( 1 - \frac{l}{l_1} \right)$$

Окончательно для принятых условий профилирования зависимость по расчету меридиональных напряжений на усеченном конусе имеет вид

$$N_1 = \frac{nhq_z \cos n\theta}{\sin \alpha} \frac{l}{y} \left( \frac{l}{y} - 1 \right) \left( \frac{l}{l_1} - 1 \right). \quad (9)$$

Тангенциальное усилие  $N_2$  находим из условия пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений

$$N_2 = \frac{nhq_z \cos n\theta}{\sin \alpha} \frac{l}{y} \left( \frac{l}{y} - 1 \right) \left( \frac{l}{l_1} - 1 \right) - \sqrt{(h\sigma_s)^2 - 4 \left( \frac{hl^2 q_z \sin n\theta}{y^2} \right)^2}. \quad (10)$$

Принимая наши координаты и учитывая схематично, что ролики касаются заготовки в точках в начале процесса профилирования, выразим поверхностную нагрузку  $q_z$  через усилие, действующее со стороны деформирующих роликов, и разложим ее в двойной ряд по искомым функциям [12] (рис. 4):

$$q_z = \frac{P}{\Delta s_l \Delta y_l} \sum_m \sum_n C_{mn} \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta.$$

Умножим правую и левую части этого выражения на  $\sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta dy d\theta$  и проинтегрируем

– правую часть в пределах по  $y$  от  $l_1$  до  $l$ , по  $\theta$  – от  $0$  до  $2\pi$ , а левую часть по  $y$  от  $y_1$  до  $y_1 + \Delta y_1$  и по  $\theta$  в пределах от  $\beta_1$  до  $\beta_1 + \Delta\beta_1$ . Тогда при  $\Delta y_1 \rightarrow 0$  и  $\Delta\beta_1 \rightarrow 0$  получим

$$C_{mn} = \frac{2P}{\pi R l_1} \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_1}{l_1} \cos n\beta_1 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta.$$

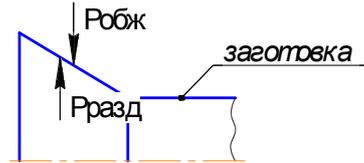


Рисунок 4 – Схема нагружения заготовки в начале первого перехода профилирования

$$q_z = \frac{2P}{\pi R_0 l_1} \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_1}{l_1} \cos n\beta_1 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta, \quad (11)$$

где  $P = P_{1B} = \frac{\pi\alpha_B}{180} R_B h \sigma_s$  – усилие, действующее на заготовку со стороны верхнего ролика [1];  $\alpha_B$  – угол захвата заготовки верхним роликом;  $R_B$  – радиус верхнего ролика;  $h$  – толщина заготовки;  $P_1 = P_{1H} = \frac{\pi\alpha_H}{180} R_H h \sigma_s$  – усилие, действующее на заготовку со стороны нижнего ролика [5];  $\alpha_H$  – угол захвата заготовки нижним роликом;  $R_H$  – радиус нижнего ролика;  $\sigma_s$  – предел текучести металла заготовки.

Тогда для участка раздачи

$$q_{z\text{разд}} = n \frac{\alpha_H}{90^\circ} \frac{R_H}{R_0} \frac{h}{l_1} \sigma_s \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_1}{l_1} \cos n\beta_1 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta, \quad (12)$$

где  $y_1, \beta_1$  – координаты точки приложения нагрузки от нижнего ролика.

Для участка обжима

$$q_{z\text{обж}} = -n \frac{\alpha_e}{90^\circ} \frac{R_e}{R_0} \frac{h}{l_1} \sigma_s \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_2}{l_1} \cos n\beta_2 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta, \quad (13)$$

где  $y_2, \beta_2$  – координаты точки приложения нагрузки от верхнего ролика.

При профилировании обода колеса на каждом переходе наиболее опасными напряжениями являются меридиональные, которые приводят к утонению металла в угловых переходах профиля и даже разрушениям заготовки в этих зонах. Поэтому, при-

водим окончательные зависимости для меридиональных внутренних усилий. Выражения для  $N_1$  будут иметь вид:

для участка раздачи:

$$N_1 = n \frac{\alpha_n R_n h \cos \theta}{90^\circ R_0 l_1 \sin \alpha} \sigma_s \frac{l}{y} \left( \frac{l}{y} - 1 \right) \left( \frac{l}{l_1} - 1 \right) \times \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_1}{l_1} \cos n\beta_1 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta. \quad (14)$$

для участка обжима:

$$N_1 = -n \frac{\alpha_n R_n h \cos \theta}{90^\circ R_0 l_1 \sin \alpha} \sigma_s \frac{l}{y} \left( \frac{l}{y} - 1 \right) \left( 1 - \frac{l}{l_1} \right) \times \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_2}{l_1} \cos n\beta_2 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta. \quad (15)$$

Выше было показано, что раздачу цилиндрической заготовки применяют с целью уменьшения растягивающих меридиональных напряжений, которые приводят к утонению профиля в его угловых переходах. Поэтому целесообразно сравнить величину напряжений, действующих в одноименных точках полуфабриката при профилировании из цилиндрической и конической заготовок.

Для обода колеса W12x24, у которого размеры цилиндрической обечайки равны:  $l = 380 \text{ мм}$ ,  $D = 568 \text{ мм}$ ,  $h = 4,5 \text{ мм}$  по заводскому технологическому процессу после раздачи (осадки) получают следующие размеры полуфабриката (рис. 5):  $D_{\text{цилиндр}} = 568 \text{ мм}$ ,  $D_{\text{конуса}} = 630 \text{ мм}$ ;  $\alpha = 20^\circ$ ,  $l = 926 \text{ мм}$ ,  $l_1 = 91 \text{ мм}$ .

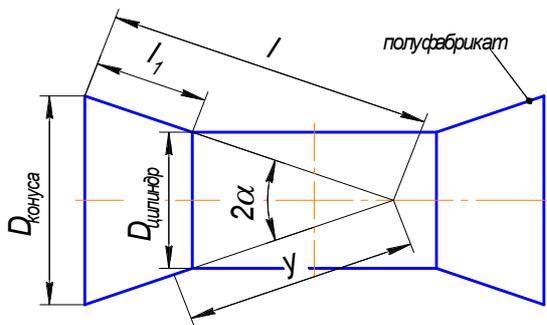


Рисунок 5 – Полуфабрикат обода W12x24 для первого перехода РРП

Допустим, нижний ролик воздействует на заготовку в точке, делящей пополам образующую усеченного конуса, тогда  $y_1 = 880 \text{ мм}$ ,  $\beta_1 = 0$ . Для цилиндрической заготовки в зоне смены знака внешней нагрузки с координатами  $x = 0$ :  $\varphi = 0^\circ$  –  $\sigma_1 = 0,4 \text{ кг/мм}^2$  при  $m = 2$ ;  $\sigma_1 = 0,17 \text{ кг/мм}^2$  при  $m = 4$ ;  $\sigma_1 = 0,13 \text{ кг/мм}^2$  при  $m = 6$ ; сумма  $\sigma_1 = 0,72 \text{ кг/мм}^2$ .

Для конической заготовки имеем для  $n = 1$ :

$$N_1 = 1 \cdot \frac{20^\circ}{90^\circ} \cdot \frac{264}{300} \cdot \frac{4,5}{91} \cdot \frac{1}{0,34} \cdot 27 \cdot \frac{926}{880} \left( \frac{926}{880} - 1 \right) \left( \frac{926}{91} - 1 \right) \times \sum_m \sum_n \sin \frac{1 \cdot 3,14 \cdot 880}{91} \cos 1 \cdot 0 \cdot \sin \frac{1 \cdot 3,14 \cdot 880}{91} \cos 1 \cdot 0 = 0,28 \text{ кг/мм},$$

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{h} = \frac{0,28}{4,5} \approx 0,06 \text{ кг/мм}^2.$$

Для  $n = 3$  –  $\sigma_1 = 0,0001 \text{ кг/мм}^2$ ; для  $n = 5$  –  $\sigma_1 = 0,3 \text{ кг/мм}^2$ ; сумма –  $\sigma_1 = 0,36 \text{ кг/мм}^2$ .

**ВЫВОДЫ.** Как показывают проведенные теоретические исследования, опасные меридиональные напряжения уменьшаются в два раза при профилировании обода колеса из конической заготовки. Однако это уменьшение меридиональных напряжений в реальных условиях деформирования будет несколько меньше, т.к. в полученных зависимостях не учитывается упрочнение металла конических полок после предварительной раздачи цилиндрической заготовки.

Анализируя математические выражения для расчета меридиональных напряжений, можно заключить, что указанные выше внутренние нагрузки снижаются с увеличением длины конической полки и угла конусности, что равноценно увеличению начального радиуса заготовки, а также с уменьшением радиусов профилирующих роликов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Макаров К.А. Применение процессов обжима и раздачи при калибровке труб и патрубков // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 1. – С. 25–28.
- Устойчивость трубных заготовок при пластическом формоизменении / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 210–217.
- Пилипенко О. В. Влияние анизотропии механических свойств трубных заготовок на технологические параметры раздачи // Известия ТулГУ. Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – Вып. 1. – С. 149–158.
- Интенсификация процесса раздачи осесимметрических трубчатых заготовок / А.В. Калюжный, В.В. Пиманов, Я.С. Олександренко, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 103–108.
- Исследование напряжений при радиальном профилировании заготовок на первых переходах / Н.В. Потекушин, Э.З. Сайфулин // Обработка металлов давлением. – Ижевск, 1974. – Вып. 2. – С. 111–114.
- Чигиринский В.В., Мазур В.Л., Беликов С.В. и др. Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: монография. – Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. – 309 с.
- 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. – К.: ООО «Компания Индустриальные технологии», 2014. – № 3 (68). – С. 56–61.

8. Пузырь Р.Г., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А. Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин»: научный рецензируемый журнал. – М.:

МГТУ «Станкин», 2013. – № 4 (27). – С. 42–47.

9. Пикуль В.В. К теории устойчивости оболочек // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 4. – С. 81–86.

10. Зайдес С.А., Исаев А.Н. Технологическая механика осесимметричного деформирования: монография. – Иркутск: ИрГТУ, 2007. – 432 с.

11. Исследование проблем устойчивости упругих тел, гибких пластин и оболочек и их приложения. Монография / Е.Т. Бажанов, Ж.С. Ержанов. – Алматы: Высшая школа Казахстана, 2001. – 300 с.

12. Аналітична механіка локально навантажених оболонок / Я.Й. Буряк, Ю.К. Рудавський, М.А. Сухорольський. – Львів: Ітелект-Захід, 2007. – 240 с.

## VOLTAGE DISTRIBUTION ON THE CONIC SECTION OF SEMI-PRODUCT PROFILE OF THE FIRST TRANSITION DURING THE RADIAL-ROTATING SHAPING

R. Puzyr, O. Dolgih, B. Hretsenko, L. Dyka

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: puzyruslan@gmail.com

The article deals with the defining of stress tensor component during the radial-rotating way of making vehicle wheel rims. The authors show that to establish the value of the appearing voltage precisely, one should apply the shell balance equation using hypotheses and assumptions of the theory of shell and plate. There are given the relations for calculating the internal force on the conic section profile of the first transition during the radial-rotating shaping and comparison of the results of shaping from cylindrical work and conic semi-product. The theoretic analysis defines that application of the works previously shaped by expanding allows halving the value of dangerous meridional voltage during the first transition of making rim contour compared to the cylindrical one. There by it is possible to decrease the metal thinning in the round parts of the semi-product.

**Key words:** side view, ring, strain, half-finished product, drum.

### REFERENCES

1. Makarov, K.A. (2000), “The application process and crimping hand during calibration tubes and pipes”, *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, no. 1, pp. 25–28.

2. Sosenushkin, E.N. and Yanovskaya, A.N. (2012), “Stability of round billets for plastic forming”, *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov Kramatorsk DGMA*, Vol. 1, no. 30, pp. 210–217.

3. Pilipenko, O.V. (2006), “Influence of anisotropy of mechanical properties of the pipe pieces on the technological parameters of distribution”, *Transactions of Tula National University*, iss. 1, pp. 149–158.

4. Kalyugny, A.V., Pimanov, V.V., Oleksandrenko, Ya.S. and Kulikov, I.P. (2014), “The intensification of the process of distribution axially symmetric tubular blanks”, *Obrabotka materialov davleniem Kramatorsk DGMA*, vol. 1, no. 38, pp. 103–108.

5. Potekushin, N.V. and Sajfulin, Je.Z. (1974), “The study stresses the radial profiling blanks on the first transitions”. *Obrabotka metalov davleniem*, no. 2, pp. 111–114.

6. Chigirinskij, V.V., Mazur, V.L., Belikov, S.V. and dr. *Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnykh sredstv i selskohozyaystvennoy tehniky. Monografiya* [Modern production of wheels of vehicles and agricultural equipment. Monograph]. RIA "Dnepr-VAL", Dnepropetrovsk, Ukraine.

7. Dragobetskiy, V.V., Puzyr, R.G., Gaykova, T.V. and Argat, R.G. (2014), “Analysis methods of process

intensification extraction and profiling of the sheet material for the purpose of their use in the operations of the rotary radial profiling closed shells to improve wheel production technology”, *Sci.-Tech. Journal Technological systems*, vol. 3, no. 68, pp. 56–61.

8. Puzyr, R.G., Sosenushkin, E.N. and Yanovskaya, A.N. (2013), “Determination of the stress field in the radial profiling rotary cylindrical workpiece without deforming tool radii”, *Scientific peer-reviewed journal Vestnik MGTU «Stankin»*, vol. 4, no. 27, pp. 42–47.

9. Pikul, V.V. (2006), “On the theory of stability of shells”, *Transactions of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, vol. 4, pp. 81–86.

10. Zaydes, S.A. and Issaev, A.N. (2007), *Tehnologicheskaya mehanika osesimmetrichnogo deformirovaniya. Monografiya* [Technological mechanics of axisymmetric deformation. Monograph], IrGTU, Irkutsk, Russia.

11. Baganov, E.T. and Erganov, G.S., (2001), *Issledovanie problem ustoychivosti uprugih tel, gibkih plastin i obolochek i ih prilozheniya. Monografiya* [Study of the problems of stability of elastic bodies, flexible plates and shells and their applications. Monograph], Vysshaya skhola Kazakstana, Almati, Kazakhstan.

12. Buryak, Ya.Y., Rudavskiy, Yu.K. and Suhorolskiy, M.A. (2007), *Analitychna mehanika lokalno navantazhenih obolonok* [Analytics mehaniks locally navantazhenih obolonok], Itelekt-Zahid, Lviv, Ukraine.

Стаття надійшла 10.05.2015.