

УДК 621.7.004

Пузырь Р. Г.
Савелов Д. В.
Дикая Л. Э.

УСТАНОВЛЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА МЕРИДИОНАЛЬНЫХ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

При интенсификации процессов листовой штамповки и профилирования листового металла большое распространение получили методы снижения величины растягивающих напряжений путем изменения граничных условий. В основном применяют силовое воздействие на торцы круглой в плане заготовки при вытяжке и совмещении операций обжима и раздачи [1, 3], а также осуществляют подпор или противонапряжение полосы при профилировании [2]. К геометрическим приемам по изменению краевых условий можно отнести вытяжку и отбортовку из спрофилированного ранее металла [4] (подгибка торцов заготовки, спрямление технологических гофров), однако, в этом случае, не удастся уменьшить меридиональные напряжения, а только избежать чрезмерного утонения металла в опасных зонах. Также к геометрическим приемам можно отнести вытяжку коробчатых деталей из заготовок различной конфигурации [5, 6].

Как показывают производственные испытания при изготовлении ободьев колес из замкнутых оболочек вращения, изменение краевых условий путем силового воздействия на торцы заготовки или спрямление технологических гофров на дне центрального ручья не дают статистически ощутимых результатов по снижению уровня меридиональных напряжений и уменьшению утонения в радиусных переходах профиля. Для изучения распределения меридиональных напряжений, которые приводят к уменьшению толщины металла в радиусных сопряжениях профиля, необходимо наличие адекватных формальных зависимостей, основанных на теории деформирования оболочек вращения. Причем установить связь величины меридиональных напряжений с формой заготовки не представляется возможным из-за отсутствия математических решений, как численных, так и аналитических. Так, например, считается, что технологический процесс с раздачей заготовки с двух сторон перед профилированием является основным при производстве всех типоразмеров ободьев колес на ПАО «Кременчугский колесный завод». В этом случае полуфабрикат приобретает форму и размеры, близкие к профилю обода первого перехода радиально-ротационного профилирования, и тем самым удается уменьшить деформации в осевом и тангенциальном направлении. Однако, теоретического описания, основанного на строгих математических выкладках, для данного приема не обнаружено.

Целью работы является построение математической модели для определения компонент тензора напряжений на радиусах закругления полуфабриката и ее реализация с помощью инженерного метода.

При решении приближенных уравнений равновесия принимались допущения и гипотезы технической теории оболочек вращения. А также считалось, что материал в очаге деформации – жесткопластическая среда, за его пределами – упругая, подчиняющаяся закону Гука. Не учитывались силы трения, действующие в осевом и тангенциальном направлении. Режим деформирования принимался монотонным, статическим.

В работе [7] на основе принятых допущений получены зависимости для расчета меридиональных и касательных внутренних усилий на радиусах закругления обода в первом переходе профилирования. Исходили из уравнений равновесия для торообразной заготовки:

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

Решения системы (1) имели вид

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A} C_1}{2} - \frac{e^{-B} C_2}{2} \right) \right] \cos \phi, \\
 S &= \left[\left(\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} + 4k \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1 \right)^{4k} \left(\frac{e^{-A} C_1}{2} + \frac{e^{-B} C_2}{2} \right) \right] \sin \phi.
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $A = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2k}{\sqrt{1-4k^2}} (4k+1)$; $B = \frac{4k}{\sqrt{1-4k^2}} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2k}{\sqrt{1-4k^2}} (4k+3)$; θ и ϕ –

криволинейные координаты; $k = \frac{a}{R}$, a – радиус сечения; R – расстояние от оси до центра сечения; C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Распределение усилий по радиусу закругления зависит от двух множителей (2) – первый увеличивает усилия по мере охвата металлом радиуса закругления деформирующего инструмента, второй – уменьшает, а также от двух постоянных C_1 и C_2 , которые, в свою очередь, напрямую зависят от граничных условий. То есть, уменьшая растягивающие напряжения в точке сопряжения поверхностей, можно добиться общего снижения уровня меридиональных напряжений по всему радиусу закругления.

В работе [8] была получена зависимость для расчета меридиональных внутренних усилий при профилировании обода на первой операции из цилиндрической заготовки для участка раздачи. Решение уравнений равновесия для цилиндрической заготовки по безмоментной теории оболочек вращения:

$$\begin{aligned}
 \frac{N_x}{dx} + \frac{dS}{ds} &= 0, \\
 \frac{dS}{dx} + \frac{dN_y}{ds} &= 0, \\
 N_y &= 0,
 \end{aligned} \tag{3}$$

имеют вид:

$$N_x = \sum_m \sum_n \frac{\sigma_s l}{m \pi R_0} \left(-\frac{n^2 l^2 \operatorname{Sin} \phi_0 n}{3 R_0^2 \pi (1 - \pi m)} + \frac{2 h s_n}{3 l (1 - k_{\text{пазд}})} \right) \operatorname{Sin} \phi_0 n \operatorname{Cos} \frac{m \pi x}{l} \operatorname{Cos} \phi n; \tag{4}$$

где l, R_0, h – длина, радиус и толщина заготовки соответственно (рис. 1).

Путем решения уравнений равновесия для конической оболочки вращения с учетом ранее приведенных допущений, а также локальности приложения нагрузки была получена зависимость для расчета величины меридиональных внутренних усилий для первого перехода радиально-ротационного профилирования из конической заготовки для участка раздачи (рис. 2, 3).

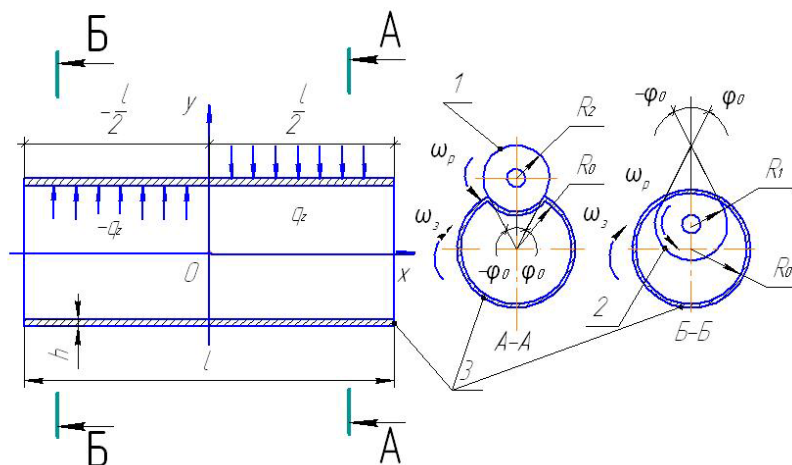


Рис. 1. Расчетная схема при профилировании цилиндрической заготовки в обод (1 – верхний ролик, 2 – нижний ролик, 3 – заготовка)

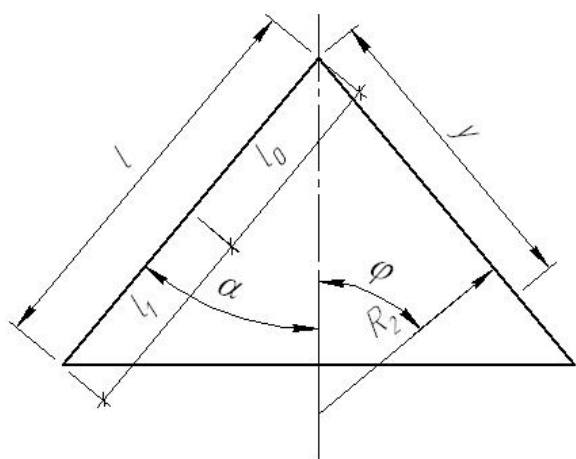


Рис. 2. Пояснения к расчету напряжений при деформировании конической поверхности

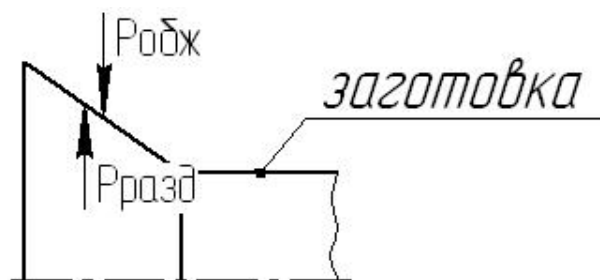


Рис. 3. Схема нагружения заготовки в начале первого перехода профилирования из конической заготовки

$$\frac{\partial N_1}{\partial y} + \frac{N_1}{y} + \frac{1}{y \sin \alpha} \cdot \frac{\partial S}{\partial \theta} = 0, \tag{5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial y} + \frac{2S}{y} = 0,$$

$$N_1 = n \frac{\alpha_H}{90^\circ} \frac{R_H}{R_0} \frac{h}{l_1} \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} \sigma_S \frac{l}{y} \left(\frac{l}{y} - 1 \right) \left(\frac{l}{l_1} - 1 \right) \times \sum_m \sum_n \sin \frac{m\pi y_1}{l_1} \cos n\beta_1 \sin \frac{m\pi y}{l_1} \cos n\theta. \tag{6}$$

где α_H – угол захвата заготовки верхним роликом; R_H – радиус верхнего ролика; h – толщина заготовки; σ_S – предел текучести металла заготовки; y_1, β_1 – точка приложения усилия профилирования.

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 $l = 380$ мм; $D = 568$ мм; $h = 4,5$ мм по заводскому технологическому процессу после раздачи (осадки) получаются следующие размеры полуфабриката (рис. 4): $D_{\text{цилиндр}} = 568$ мм, $D_{\text{конуса}} = 630$ мм, $\alpha = 20^\circ$, $l = 926$ мм, $l_1 = 91$ мм.

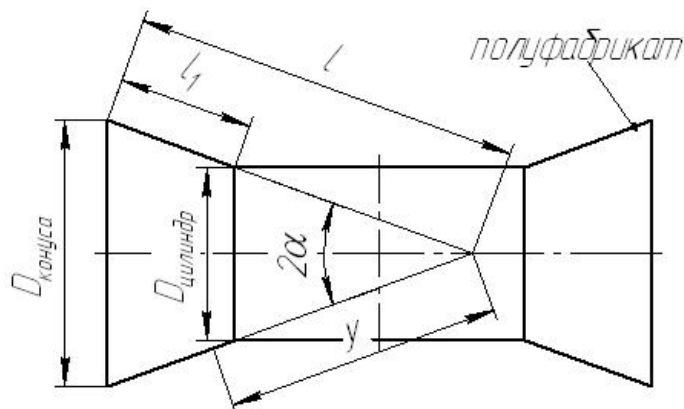


Рис. 4. Полуфабрикат обода $W12x24$ для первого перехода радиально-ротационного профилирования

Допустим, нижний ролик воздействует на заготовку в точке, делящей пополам усеченный конус, тогда $y_1 = 880$ мм, $\beta_1 = 0$.

Для цилиндрической заготовки (1) в зоне смены знака внешней нагрузки с координатами $x = 0$, $\phi = 0^\circ$ – $\sigma_1 = 0,4$ кг/мм² при $m = 2$; $\sigma_1 = 0,17$ кг/мм² при $m = 4$; $\sigma_1 = 0,13$ кг/мм² при $m = 6$; сумма $\sigma_1 = 0,72$ кг/мм². Для конической заготовки имеем для $n = 1$

$$N_1 = 1 \cdot \frac{20^\circ}{90^\circ} \cdot \frac{264}{300} \cdot \frac{4,5}{91} \cdot \frac{1}{0,34} \cdot 27 \cdot \frac{926}{880} \left(\frac{926}{880} - 1 \right) \left(\frac{926}{91} - 1 \right) \times$$

$$\times \sum_m \sum_n \sin \frac{1 \cdot 3,14 \cdot 880}{91} \cos 1 \cdot 0 \cdot \sin \frac{1 \cdot 3,14 \cdot 880}{91} \cos 1 \cdot 0 = 0,28 \text{ кг/мм},$$

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

Для $n = 3$ – $\sigma_1 = 0,0001$ кг/мм²; для $n = 5$ – $\sigma_1 = 0,3$ кг/мм²; сумма – $\sigma_1 = 0,36$ кг/мм².

Как показывают проведенные теоретические исследования, растягивающие меридиональные напряжения уменьшаются в 2 раза при профилировании обода колеса из конической заготовки. Однако это уменьшение меридиональных напряжений в реальных условиях деформирования будет несколько меньше, так как в полученных зависимостях не учитывается упрочнение металла конических полок после предварительной раздачи.

ВЫВОДЫ

Теоретически показано, что на величину и распределение растягивающих меридиональных напряжений на радиусах закругления профиля обода во время деформирования большое влияние оказывают геометрические граничные условия. Изменение формы заготовки влечет снижение меридиональных напряжений в точках сопряжения поверхностей и соответственно по всему радиусу закругления. Так как замкнутая оболочка деформируется как конструкция, где решающее значение имеет ее Гауссова кривизна, то для интенсификации процесса профилирования ободьев колес

необходимо рассмотреть не только цилиндрические и конические заготовки, но также заготовки других пространственных форм и сравнить полученные результаты. Изменение силовых граничных условий в осевом направлении не приводит к снижению растягивающих напряжений при деформировании замкнутых оболочек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Е.А. *Основы теории листовой штамповки* / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Тришевский И.С. *Теоретические основы процесса профилирования* / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
3. Калюжний О.В. *Визначення максимального зусилля деформування та потовщення фланця при витягуванні з диференційованим радіальним підпором фланця заготовки* / О.В. Калюжний // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 38–44.*
4. Стеблюк В.И. *Особенности напряжённо-деформированного состояния при вытяжке полых изделий из предварительно спрофилированных заготовок* / В.И. Стеблюк, М.В. Орлюк, В.А. Полищук // *Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 8. – С. 23–27.*
5. Стеблюк В.И. *Розвиток аналітичних методів розрахунку розмірів та форми заготовок і переходів при витягуванні коробчастих виробів із листового металу* / В. І. Стеблюк, О.В. Холявик // *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», 2007. – Вып.50. – С. 56–58.*
6. Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке* / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
7. *Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece* / R. Puzyr, D. Savelov, R. Argat, A. Chernish // *Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 27–32.*
8. *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.*

REFERENCES

1. Popov E.A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki* / E. A. Popov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 278 s.
2. Trishevskij I.S. *Teoreticheskie osnovy processa profilirovaniya* / I.S. Trishevskij, M.E. Doktorov. – M.: Metallurgija, 1980. – 288 s.
3. Kaljuzhnij O.V. *Viznachennja maksimal'nogo zusillja deformuvannja ta potovshhennja flancja pri vitjaguvanni z diferencijovanim radial'nim pidporom flancja zagotovki* / O.V. Kaljuzhnij // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 1 (30). – S. 38–44.*
4. Stebljuk V.I. *Osobennosti naprezhjonno-deformirovannogo sostojanija pri vytjazhke polyh izdelij iz predvaritel'no sprofilirovanyh zagotovok* / V.I. Stebljuk, M.V. Orljuk, V.A. Polishhuk // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. – 2000. – № 8. – S. 23–27.*
5. Stebljuk V.I. *Rozvitok analitichnih metodiv rozrahunku rozmiriv ta formi zagotovok i perehodiv pri vitjaguvanni korobchastih virobiv iz listovogo metalu* / V. I. Stebljuk, O.V. Holjavik // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kievskij politehničeskij institut», 2007. – Vyp.50. – S. 56–58.*
6. Romanovskij V.P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke* / V.P. Romanovskij. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – 520 s.
7. *Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece* / R. Puzyr, D. Savelov, R. Argat, A. Chernish // *Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 27–32.*
8. *Analiz metodov intenzifikacii processov vytjazhki i profilirovaniya listovogo materiala s cel'ju ih primenenija v operacijah radial'no-rotacionnogo profilirovaniya zamknutyh obolochek dlja sovershenstvovanija tehnologij kolesnogo proizvodstva* / V.V. Dragobekckij, R.G. Puzyr', T.V. Gajkova, R.G. Argat // *Tehnologičeskie sistemy. Nauchno-tehničeskij zhurnal. – Kiev: ООО «Kompanija Industrial'nye tehnologii». – 2014. – №3 (68). – S. 56–61.*

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

Савелов Д. В. – канд. техн. наук, доц. КрНУ

Дикая Л. Э. – ассист. КрНУ

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

E-mail: puzyruslan@gmail.com, dmi33407503@yandex.ru, lu.di@mail.ru