

The change of specific work of deformation during upsetting by flat anvil-plates of billets from different materials in different conditions was research. Method of count of contact friction factor during calculation of a work of deformation was proposed. The macro-indexes for estimation of changing of form during upsetting of billets from different materials were proposed on the base empirical data about lows of barreling and their functional connection with specific work of deformation was finding.

**Keywords:** upsetting, flat anvil-plates, billet, work of deformation, macro-indexes of the changing forms, functional connection.

УДК 621.7.044

*Р. В. ЛЕВЧЕНКО*, аспирант, КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг,  
*Е. А. НАУМОВА*, ассистент, КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг,  
*Р. Г. ПУЗЫРЬ*, канд. техн. наук, доц., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБЕЧАЕК

Распределение напряжений и деформаций при локальном деформировании оболочек вращения, что имеет место при производстве ободьев колес из цилиндрических сварных заготовок, существенно отличается от напряженно-деформированного состояния заготовки в традиционных операциях листовой штамповки. Опираясь на теорию упругого деформирования оболочек вращения, можно интенсифицировать операции локального обжима и раздачи, путем усовершенствования используемого оборудования. Показано, что при действии на оболочку сосредоточенной нагрузкой в окружном направлении возникает разноименное напряженное состояние. Только в месте приложения нагрузки тангенциальные напряжения сжимающие, на выходе из очага деформации – они равны нулю, а в ненагруженной части цилиндра – растягивающие. Это необходимо учитывать при проектировании рациональных технологических процессов локального деформирования.

**Ключевые слова:** обжим, раздача, заготовка, локальная деформация.

**Введение.** Производство стальных ободьев колес автомобилей и других транспортных средств, преимущественно, основано на процессах локального деформирования цилиндрической заготовки парой вращающихся роликов и операций листовой штамповки – раздачи и обжима.

**Анализ последних исследований и литературы.** Сущность операций раздачи и обжима хорошо освещена в литературе [1, 2], где определяется напряженно-деформированное состояние полуфабриката в зависимости от условий деформирования и геометрических параметров заготовки и инструмента. При этом в процессе обжима создаются благоприятные условия для перехода металла в пластическое состояние, так как в очаге деформации действуют сжимающие меридиональные и тангенциальные напряжения. Условия перехода заготовки в пластическое состояние определяются по гипотезе максимальных касательных напряжений в виде

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s, \quad (1)$$

т.е., когда величина тангенциального сжимающего напряжения достигнет предела текучести материала [2]. Очаг деформации в процессе обжима (раздачи) представляет собой кольцевой участок определенного диаметра и ширины, причем размеры его постоянно изменяются в зависимости от движения инструмента.

Геометрический очаг деформации при формоизменении цилиндрической заготовки роликом (осадка, раздача) отличается от указанного выше. Он представляет собой пятно контакта между вращающимися деформирующим инструментом и заготовкой в каждый последующий этап деформирования, что обуславливает снижение усилий локального обжима или раздачи в 5-10 раз по сравнению с традиционными методами. Отсюда вытекают особенности напряженно-деформированного состояния при локальном действии сил.

© Р. В. Левченко, Е. А. Наумова, Р. Г. Пузырь, 2012

**Цель исследований, постановка проблемы.** Целью исследований является анализ напряженного деформированного состояния заготовки при радиально-ротационном профилировании для изыскания возможности направленного воздействия на очаг деформации.

**Материалы исследований.** Известно [1], что с ростом величины упругих деформаций потенциальная энергия тела возрастает и при достижении напряжениями предела упругости тело переходит в пластическое состояние.

Имеется ряд упругих решений [3] для оболочек вращения при нагружении их сосредоточенной силой или распределенной нагрузкой, которые описывают распределение усилий и перемещений, возникающих в цилиндрической заготовке при локальном приложении сил, что необходимо взять за основу для определения напряженного состояния в процессе обжима или раздачи заготовки обода колеса с помощью пары вращающихся роликов.

Так допустим, что к верхнему торцу цилиндра приложена радиальная нагрузка  $q$ , распределенная согласно закону:

$$\text{при } -90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad q = -q_{max} \cos \varphi;$$

$$\text{при } 90^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ \quad q = 0.$$

Нагрузка  $q$  считается положительной, если она направлена от центра. Такая схема распределения нагрузки возможна при профилировании (обжиге, раздаче) краевых участков заготовки обода колеса (рис. 1).

Наиболее точное решение задач такого рода может быть получено на основании моментной теории, в которой учитываются изгибающие моменты в стенке оболочки, как в продольном, так и в поперечном направлении. Однако практическое решение задач по моментной теории связано со сложными вычислениями. Более просто задачи о несимметричной деформации цилиндрических оболочек решаются по полубезмоментной теории В. З. Власова [3].

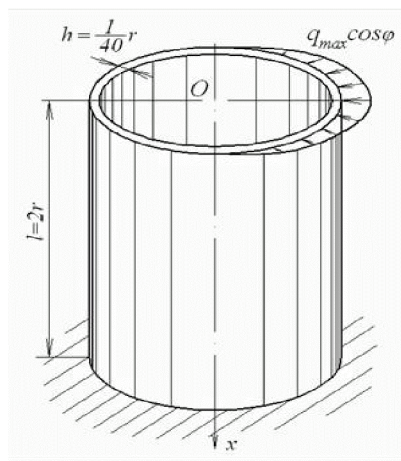


Рис. 1 – Расчетная схема

В этой теории, кроме общих гипотез теории оболочек Кирхгофа-Лява, введены дополнительные допущения.

1. Принимается, что нормальные напряжения в сечениях, перпендикулярных оси оболочки, равномерно распределены по толщине стенки (но переменны по окружности).

Первое допущение можно сформулировать также иначе: изгибающий момент  $M_x$  в стенке оболочки в продольном направлении считается равным нулю, т. е. нормальные напряжения в поперечных сечениях оболочки приводятся только к осевому усилию  $T_x$ , интенсивность которого переменна по окружности.

2. Касательные напряжения  $\tau_{xt}$ , перпендикулярные срединной поверхности, и соответствующая им поперечная сила  $Q_x$  принимаются равными нулю.

Касательные напряжения  $\tau_{xt}$ , направленные по окружности, считаются равномерно распределенными по толщине стенки. Эти напряжения приводятся к сдвигающей силе  $S$ , интенсивность которой также переменна по окружности.

3. Оболочка считается нерастяжимой в окружном направлении. Относительное удлинение срединной поверхности в окружном направлении принимается равным нулю.

4. Угловая деформация срединной поверхности также принимается равной нулю. Это допущение аналогично допущению, принимаемому в теории стесненного кручения тонкостенных стержней, согласно которому угловая деформация срединной поверхности считается равной нулю, несмотря на наличие касательных напряжений стесненного кручения.

5. Взаимное влияние продольной и поперечной деформации не учитывается, т.е. коэффициент Пуассона считается равным нулю.

Представим нагрузку в виде ряда

$$q = q_0 + \sum_1^{\infty} \bar{q}_k \cos k\varphi \quad (2)$$

Для определения  $q_0$  проинтегрируем правую и левую части равенства от 0 до  $360^\circ$ :

$$\int_0^{90} (-q_{max} \cos \varphi) d\varphi + \int_{270}^{360} (-q_{max} \cos \varphi) d\varphi = q_0 2\pi,$$

Откуда

$$q_0 = \frac{-q_{max}}{\pi}. \quad (3)$$

Для определения  $q$  умножим правую и левую части равенства на  $\cos k\varphi$  и также проинтегрируем от 0 до  $360^\circ$ :

$$2 \int_0^{90} (-q_{max} \cos \varphi) \cos k\varphi d\varphi = \int_0^{360} (\bar{q}_k \cos^2 k\varphi) d\varphi.$$

При  $k = 1, -q_{max} \frac{\pi}{2} = \bar{q}_1 \pi$ ,

откуда  $\bar{q}_1 = \frac{q_{max}}{2}$ .

При  $k \geq 2$ ,

$$-2q_{max} \left[ \frac{\sin[(k+1)\varphi]}{2(k+1)} + \frac{\sin[(k-1)\varphi]}{2(k-1)} \right]_0^{\pi/2} = \bar{q}_k \pi,$$

откуда

$$\bar{q}_k = \frac{q_{max}}{\pi} \left[ \frac{\sin \frac{(k+1)\pi}{2}}{k+1} + \frac{\sin \frac{(k-1)\pi}{2}}{k-1} \right].$$

Таким образом, для заданной нагрузки получаем следующий ряд:

$$q = -\frac{q_{max}}{\pi} - \frac{q_{max}}{2} \cos \varphi - \frac{2q_{max}}{3\pi} \cos 2\varphi + \frac{2q_{max}}{15\pi} \cos 4\varphi - \frac{2q_{max}}{35\pi} \cos 6\varphi + \frac{2q_{max}}{63\pi} \cos 8\varphi + \dots$$

Первый член ряда соответствует равномерно распределенной радиальной нагрузке. Деформации и напряжения от этой составляющей вычисляют по формулам теории осесимметричной деформаций цилиндрических оболочек. Эти напряжения и деформации сравнительно малы и при удалении от верхнего края быстро затухают.

Найдем деформации и напряжения от составляющих нагрузки, соответствующих остальным членам ряда.

Так как радиальные силы, приложенные к торцу, не могут быть учтены в граничных условиях непосредственно, их нужно заменить эквивалентными сдвигающими силами

$$S_0 = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{q}_k k \sin k\varphi = -\frac{q_{max}}{2} \sin \varphi - \frac{4}{3} \frac{q_{max}}{\pi} \sin 2\varphi + \frac{8}{15} \frac{q_{max}}{\pi} \sin 4\varphi - \frac{12}{35} \frac{q_{max}}{\pi} \sin 6\varphi + \frac{16}{63} \frac{q_{max}}{\pi} - \dots$$

Положительное направление усилия  $S_0$  противоположно положительному направлению отсчета угла  $\varphi$ .

Рассмотрим составляющую нагрузки, соответствующую  $k=1$ . Параметр

$$\beta_k = \sqrt[4]{\frac{h^2 k^4 (k^2 - 1)^2}{48r^2}},$$

где  $h$  и  $r$  – переменные, заданные в условии (рис. 1), в этом случае равен нулю и решением дифференциального уравнения, будет выражение

$$v_1 = \bar{v}_1 \sin \varphi = [D_1 + D_2 x + D_3 x^2 + D_4 x^3]. \quad (4)$$

Для определения постоянных, используем граничные условия: при  $x=0, T_x=0$ ;

$$S = \bar{q}_1 \sin \varphi = -\frac{q_{max}}{2} \sin \varphi,$$

при  $x=1, v=0, u=0$ .

Эти условия с учетом выражений для силовых факторов через окружное перемещение приводят к системе уравнений, решение которой дает:

$$D_3 = 0, D_4 = \frac{q_{max}}{12r^2 Eh};$$

$$D_2 = \frac{q_{max} l^2}{4r^2 Eh}; D_1 = \frac{q_{max} l^3}{6r^2 Eh}.$$

Следовательно,

$$v_1 = \frac{q_{max} l^3}{12r^2 Eh} \left[ 2 - 3 \frac{x}{l} + \frac{x^3}{l^3} \right] \sin \varphi. \quad (5)$$

Найдем функцию  $v_k$ , соответствующую  $k$ -й составляющей нагрузки.

Зададимся размерами оболочки:  $h = \frac{1}{40} r, l = 2r$ .

Выбрав начало координат на верхнем краю оболочки, запишем уравнения граничных условий:

$$\text{при } x = 0, T_{xk} = 0; S_k = \bar{q}_k k \sin k\varphi;$$

$$\text{при } x = l, v_k = 0, u_k = 0.$$

На основании этих условий найдем коэффициенты для функций Крылова

$$A_{3k} = 0; A_{4k} = -\frac{\bar{q}_k k^3}{r^2 E h \beta_k^3};$$

$$A_{2k} = \frac{v_1(\beta_k l) v_3(\beta_k l) + 4v_4^2(\beta_k l)}{v_1^2(\beta_k l) + 4v_2(\beta_k l) v_4(\beta_k l)} A_{4k};$$

$$A_{2k} = \frac{v_2(\beta_k l) v_3(\beta_k l) + v_1(\beta_k l) v_4(\beta_k l)}{v_1^2(\beta_k l) + 4v_2(\beta_k l) v_4(\beta_k l)} A_{4k}.$$

**Результаты исследований.** Заменяя функции Крылова их выражениями, после несложных преобразований получим

$$A_{2k} = \frac{1}{2} \frac{\text{sh}^2(\beta_k l) + \sin^2(\beta_k l)}{\text{ch}^2(\beta_k l) + \cos^2(\beta_k l)} A_{4k};$$

$$A_{2k} = \frac{1}{2} \frac{\text{sh}(\beta_k l) \text{ch}(\beta_k l) + \sin(\beta_k l) \cos(\beta_k l)}{\text{ch}^2(\beta_k l) + \cos^2(\beta_k l)} A_{4k}.$$

Найдем радиальное перемещение  $w$  на верхнем торце:

$$w_{x=0} = -\left(\frac{\partial v}{\partial \varphi}\right)_{x=0} = -\frac{q_{max} l^3}{6r^2 E h} \cos \varphi - \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} k A_{1k} \cos k\varphi. \quad (6)$$

Осевое усилие  $T_x$  у нижнего торца:

$$T_x = -\int_{\varphi} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} r E h d\varphi = \frac{q_{max} l}{2r} \cos \varphi + \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{r E h \beta_k^2}{r} \begin{bmatrix} -4A_{1k} v_3(\beta_k l) - \\ -4A_{2k} v_4(\beta_k l) + \\ + A_{4k} v_2(\beta_k l) \end{bmatrix} \cos k\varphi. \quad (7)$$

Расчетные значения сведены в таблицу.

Для проектирования параметров нажимного устройства, которое создавало бы требуемый подпор и изменяло схему напряженного состояния, получены все необходимые данные. Оно представляет собой подпружиненный ролик (рис. 2), который воздействует на материал перед очагом деформации.

Таблица – Результаты вычислений  $w$  при нескольких значениях  $k$

k	$A_{4k}$	$A_{2k}$	$A_{1k}$	$w_{x=0} \cdot \frac{E}{q_{max}}$ при $\varphi^\circ$		
				0	90	180
1	-	-	-	-3420	0	3420
2	$7540 \frac{q_{max}}{E}$	$-637 \frac{q_{max}}{E}$	$1550 \frac{q_{max}}{E}$	-3100	3100	-3100
4	-135,2	60,0	-55,6	167	167	167
6	16,3	-8,13	8,14	-49	49	-49
8	-3,71	1,85	-1,85	15	15	15
$\Sigma$				-6380	3330	450



Рис. 2 – Профілювання обода с нажимним пристроєм

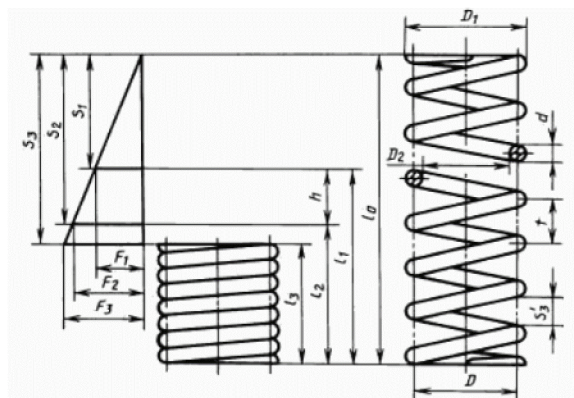


Рис. 3 – Схема для розрахунку пружини стиснення

Визначалися параметри пружини стиснення по існуючим даним згідно ГОСТ 13765-86.

Вихідними величинами для визначення розмірів пружини були сила, яку повинен розвивати нажимний механізм (визначається по залежності (7)), робочий хід, найбільша швидкість переміщення рухомого кінця пружини і попередній діаметр, який обмежується габаритами корпусу.

**Висновки.** З приведеного рішення можна зробити висновок про розподіл тангенціальних напружень і деформацій в процесі локального обжиму заготовки обода колеса: при встановленні деформуючого ролика в заготовку пластичним стискаючим тангенціальним деформаціям передують стискаючі еластичні тангенціальні напруження в зоні дії інструмента, на межі зони деформації стискаючі напруження рівні нулю і при виході з неї, тангенціальні напруження стають розтягуючими.

Інтенсифікацію процесів холодної штампування проводять, змінюючи схеми зовнішнього впливу на заготовку шляхом заміни крайових умов у зони деформації або шляхом цілеспрямованого змінювання напруження текучості в різних зонах зони деформації [2]. Звідси випливає, що, впливаючи на межі зони деформації в тангенціальному напрямку при профілюванні обода, додатково створюючи стискаючі напруження і як би заталкуючи ділянку заготовки в зону деформації, можна досягти збільшення допустимого за один перехід формозмінення або утолщення металу в небезпечних зонах.

**Список літератури:** 1. *Сторожев М. В.* Теорія обробки металів тисненням / *М. В. Сторожев, Е. А. Попов.* – М.: Машинобудування, 1977. – 423 с. 2. *Попов Е. А.* Основи теорії листової штампування / *Е. А. Попов.* – М.: Машинобудування, 1977. – 278 с. 3. *Тимошенко С.П.* Пластинки і оболонки / *С.П. Тимошенко, С. Войновський-Кригер.* – М.: Наука, 1966. – 635 с.

Надійшла до редколегії 22.10.2012

УДК 621.7.044

**Визначення параметрів нажимного пристрою при профілюванні обода / Левченко Р. В., Наумова Е. В., Пузырь Р. Г.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С.61-67. – Бібліогр.: 3 назв.

Розподіл напружень і деформацій при локальному деформуванні оболонок обертання, що має місце при виробництві ободів коліс із циліндричних зварених заготовок, суттєво відрізняється від напружено-деформованого стану заготовки в традиційних операціях листового штампування. Спираючись на теорію еластичного деформування оболонок обертання, можна інтенсифікувати операції локального обтиску й роздачі, шляхом удосконалення устаткування. Показано, що при дії на оболонку зосередженим

навантаженням в окружному напрямку виникає різнойменний напружений стан. Тільки в місці дії навантаження тангенціальні напруги стискаючі, на виході з осередку деформації – вони дорівнюють нулю, а в ненавантаженій частині циліндра – розтягувальні. Це необхідно враховувати при проектуванні раціональних технологічних процесів локального деформування.

**Ключові слова:** обтиск, роздача, заготовка, локальна деформація.

The distribution of stress and strain in the local deformation of shells of revolution, which is the case in the production of wheel rims of cylindrical welded blanks, is very different from the stress-strain state of the storage in the traditional operations stamping. Relying on the theory of elastic deformation of shells of revolution, we can intensify local crimping operations and distribution, by improving the equipment used. It is shown that under the action of a concentrated load on the shell in the circumferential direction of opposite occurs stress. Only where the load is applied compressive tangential stresses at the exit of the deformation zone – they are zero, and in the unloaded part of the cylinder – stretching. This should be considered when designing a rational process of local deformation.

**Keywords:** crimp, distribution, storage, local deformation.

УДК 621.7:519.85

*В. М. МИХАЛЕВИЧ*, докт. техн. наук, проф., ВНТУ, Вінниця

*В. А. МАТВІЙЧУК*, докт. техн. наук, проф., ВНАУ, Вінниця

*Е. А. ТРАЧ*, аспірант, ВНТУ, Вінниця

*Ю. В. ДОБРАНЮК*, канд. техн. наук, ВНТУ, Вінниця

*В. С. ЗАЙКОВА*, студентка, ВНТУ, Вінниця

## ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ ОСНОВНОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Рассмотрена задача моделирования предельного состояния материала боковой поверхности цилиндрических образцов при осесимметричном сжатии. Получена новая форма модели предельного состояния материала и усовершенствована методики построения кривой предельных деформаций, что позволило сократить время построения графика одной кривой более, чем в 10 раз.

**Ключевые слова:** осесимметричное сжатие, боковая поверхность, напряженно-деформированное состояние, предельная деформация.

**Введение.** Появление мощных вычислительных комплексов для математического моделирования формоизменения и напряженно-деформированного состояния материала в процессах обработки давлением открыло новые перспективы теоретического анализа и совершенствования существующих технологий. Важным практическим направлением является моделирование предельного состояния материала в условиях пластического формоизменения. За последние несколько десятилетий широкое признание и применение получил метод оценки предельного состояния материала [1-6], традиционно называемый теорией деформируемости. Однако сведения о результатах применения данного подхода зачастую носят фрагментарный характер, затрудняющий анализ и использование опубликованных результатов. Кроме того, стремительно совершенствующаяся вычислительная база требует постоянного обновления программных реализаций математических моделей предельных состояний в новой языковой среде. Для повышения эффективности данного подхода, воспроизводимости результатов моделирования, полученных различными коллективами необходима строгая постановка задач оценки предельного состояния и разработка эффективных алгоритмов ее решения.

В работах [7-10] рассмотрена задача определения предельных деформаций материала боковой поверхности цилиндрического образца при осесимметричной осадке. Построена схема вычислений, основанная на применении комбинированного метода хорд и касательных. В данной работе приводится усовершенствование ранее разработанной вычисли-

© В. М. Михалевич, В. А. Матвийчук, Е. А. Трач, Ю. В. Добранюк, В. С. Зайкова, 2012