

УДК 621.7.044

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЗАТУХАНИЯ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА ПРИ РАЗДАЧЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Р. Г. Пузырь

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Исследования направлены на уменьшение интенсивности деформирования на последующих переходах профилирования с целью обеспечения минимальной разнотолщинности ободьев колес. Проведены теоретические исследования по определению изгибающего момента, действующего на участке свободного изгиба при раздаче коническими пуансонами цилиндрической заготовки. Показано что для определения величины напряжений, действующих в меридиональном направлении, необходимо принимать во внимание геометрию заготовки и исходить из положений безмоментной теории оболочек и суммированием краевого эффекта, который учитывает влияние изгибающего момента на распределение напряжений. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что распределение изгибающего момента по образующей цилиндрической поверхности носит затухающий колебательный характер, а возникновение потери устойчивости происходит вследствие действия колебательной нагрузки на выходе из участка свободного изгиба.

Ключевые слова: обод, пуансон, напряжение, деформация, раздача, изгибающий момент, интенсивность деформирования.

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ЗГАСАННЯ ЗГИНАЛЬНОГО МОМЕНТУ ПРИ РОЗДАЧІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗАГОТОВКИ

Р. Г. Пузир

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

Дослідження спрямовані на зменшення інтенсивності деформування на наступних переходах профілювання з метою забезпечення мінімальної різнотовщинності ободів коліс. Проведені теоретичні дослідження щодо визначення моменту що згинає, який діє на ділянці вільного вигину при роздачі конічними пуансонами циліндричної заготовки. Показано, що для визначення величини напружень, що діють в меридіональному напрямку необхідно приймати до уваги геометрію заготовки й виходити з положень безмоментної теорії оболонок й додаванням крайового ефекту, який враховує вплив моменту, що вигинає, на розподіл напружень. Результати досліджень дозволяють зробити висновок, що розподіл моменту, що вигинає по утворюючий циліндричної поверхні, носить затухаючий коливальний характер й виникнення втрати стійкості відбувається внаслідок дії коливального навантаження на виході з ділянки вільного вигину.

Ключові слова: обід, пуансон, напруження, деформація, роздача, момент що згинає, інтенсивність деформування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Учет изгиба и спрямления заготовки во время раздачи коническими пуансонами ведется по приращению меридиональных напряжений, возникающих в результате действия изгибающего момента, действующего в меридиональном направлении [1, 2]. Вывод формул для определения величины изгибающих моментов дан во многих работах, в частности, этому вопросу большое внимание уделено Е.И. Мошниним [1].

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния заготовки при раздаче коническими пуансонами с учетом геометрических свойств цилиндрических заготовок, вычисления границ зоны действия изгибающих моментов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При раздаче деформирование заготовки ограничивается коэффициентом раздачи, который можно увеличить путем увеличения коэффициента трения между заготовкой и инструментом, но при этом увеличивается усилие и вероятность потери устойчивости [2].

Потеря устойчивости заготовки вблизи участка свободного изгиба объясняется действием изгибающих моментов на границе этого участка. В результате образуется кольцевая волна, имеющая тот

же знак кривизны в меридиональном сечении, что и на участке свободного изгиба.

Совместное решение уравнения равновесия и уравнения пластичности, а также отыскание постоянной интегрирования из граничных условий $s_r = 0$ при $r = R_u$ позволяет определить меридиональные напряжения, действующие в очаге деформации [2]:

$$s_r = -s_s \left(1 + \frac{tga}{m} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R_u} \right)^{\frac{m}{tga}} \right], \quad (1)$$

где s_r и s_q – нормальные напряжения, действующие в меридиональном и широтном направлениях; μ – коэффициент трения; ρ – текущий радиус; α – угол конусности пуансона.

Для третьего участка деформации учет изгиба и спрямления элементов заготовки определяется по формуле:

$$M = \frac{1}{4} s_s s^2, \quad (2)$$

где s – толщина заготовки, что увеличивает меридиональные напряжения на выходе из очага деформации.

Поэтому третий участок ввиду малой его протяженности можно рассматривать как цилиндрический и применять для анализа поля напряжений уравнения теории цилиндрических оболочек (рис. 1).

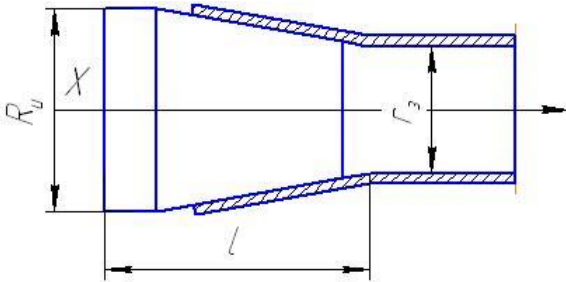


Рисунок 1 – Схема деформирования цилиндрической заготовки

Дифференциальное уравнения равновесия элемента заготовки при осесимметричной деформации было получено А.А. Ильюшиным [3]:

$$\frac{d^4 \bar{w}}{dx^4} + 4\bar{w} = \bar{p} + l dt + l \frac{d^2 dm}{dx^2}, \quad (3)$$

где $\bar{w} = \frac{w}{ae_s}$; w – радиальное перемещение элемента оболочки; a – радиус заготовки; e_s – деформация пропорциональная пределу текучести; \bar{p} – контактное давление; λ – показатель упрочнения материала; dt – вариация безразмерного усилия; dm – вариация безразмерного момента в меридиональном направлении;

$$\bar{x} = \frac{x\sqrt{3}}{\sqrt{2ah}};$$

h – толщина заготовки.

Приближенным решением данного уравнения [3] можно назвать такое, при котором вариации сил и моментов тождественно равны нулю $\delta t=0$, $\delta m=0$ и отсутствует поверхностная нагрузка, так как третий участок не соприкасается с инструментом, тогда получаем уравнение:

$$\frac{d^4 \bar{w}}{d\bar{x}^4} + 4\bar{w} = 0. \quad (4)$$

Подставляя обозначения для \bar{x} и \bar{w} найдем:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2ah}} w = 0. \quad (5)$$

Решение однородного уравнения (5) ищем в виде $w = e^{-bx}(A_1 \sin bx + A_2 \cos bx) + e^{bx}(A_3 \sin bx + A_4 \cos bx) + \bar{w}$ где A_1, A_2, A_3, A_4 – новые постоянные (действительные).

Приравняв напряжения на участке свободного изгиба и на выходе из очага деформации и исходя из того что, напряжение τ_{zr} не зависит от координаты X и ввиду малости толщины заготовки по сравнению с

другими элементами заготовки, определяется условием Амонтона–Кулона $t_{zr} = t_k = ms_k$, тогда напряжения s_r и s_q на участке свободного изгиба будут равны:

$$s_r = s_s \left(\left[\left[1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \right] \left(1 - \frac{x}{r} \right) - 1 \right] / 1 - \frac{l}{r_3} \right)$$

$$s_r = s_s \left(\left[1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \right] \left(1 - \frac{x}{r} \right) / 1 - \frac{l}{r_3} \right). \quad (6)$$

Найдем прогиб в конце третьего участка в направлении радиуса заготовки, который появляется при действии выше полученных напряжений. Известно [3], что тангенциальная деформация равна $e_q = \frac{w}{R}$, где w – прогиб заготовки в направлении радиуса. Из связи напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности при плоском напряженном состоянии:

$$e_q = \frac{e_i}{2s_i} (2s_q - s_r), \quad (7)$$

где при отсутствии упрочнения материала и исходя из принятого закона пластичности, можно принять

$s_s = s_i$ и $e_i = \frac{s_s}{E}$, тогда:

$$e_q = \frac{1}{2E} (2s_q - s_r) = \frac{w}{R}. \quad (8)$$

Для прогиба получим выражение, используя зависимости (6), (7) и (8):

$$w'' = \frac{s_s}{E} \left(\frac{\left[1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \right]}{1 - \frac{l}{r_3}} \left(1 - \frac{x}{r} \right) - 1 \right). \quad (9)$$

Сумма решения безмоментного состояния и краевого эффекта даст следующее решение в конце третьего участка с координатой $l-x$, где l – длина конусной части пуансона:

$$w = w' + w'' = e^{-bx}(A_1 \sin bx + A_2 \cos bx) + \frac{s_s}{E} \left(\frac{\left[1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \right]}{1 - \frac{l}{r_3}} \left(1 - \frac{x}{r} \right) - 1 \right). \quad (10)$$

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 находим из граничных условий, где надо положить ввиду малости протяженности третьего участка при $x=l$ $w=0$; $\frac{dw}{dx}=0$; $r=r_3$, тогда:

$$w = \frac{s_s}{E} \left(1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \left(2 + \frac{l}{b(r_3 - l)} \right) - 2 \right).$$

Изгибающий момент, действующий в меридиональном направлении на участке свободного изгиба равен [3]:

$$M = -\left(d^2 w / dx^2\right) kD, \quad (11)$$

где k – отношение модуля Кармана к модулю Юнга, приближенно можно принять $k \approx 1$; D – цилиндрическая жесткость оболочки.

Тогда дифференцируя выражение для прогиба дважды получим величина момента при $x = l$ т.е. на участке свободного изгиба:

$$M = -\frac{2S_s}{E} D \left[\left(1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \right) \left(1 + \frac{l}{b(r_3 - l)} \right) - 1 \right]$$

Учитывая, что $D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ окончательно получим:

$$M = -\frac{S_s h^3}{6(1 - \nu^2)} \left[\left(1 - \left(1 + \frac{m}{tga} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) \right) \times \left(1 + \frac{l}{b(r_3 - l)} \right) - 1 \right], \quad (12)$$

где ν – коэффициент Пуассона; h – толщина заготовки.

Нас интересуют значения момента за участком свободного изгиба, там, где происходит образование продольной складки с потерей устойчивости заготовки. Как видно из выражения (12) распределение момента по длине заготовки зависит от двух характерных для оболочек величин β и D и носит волновой затухающий характер.

Определим половину длины волны затухания момента, т.е. разность аргументов между двумя соседними экстремумами или нулями функции.

При $x = l$, $\cos b(l - x) = 1$.

При $l - x = p / 2b$ или при $x = l - p / 2b$, $\cos b(l - x) = 0$.

Таким образом, половина длины волны равна $d = p / b$, а вся волна $2d = 2p / b$.

Например, размеры обечайки для обода колеса W12x24 равны: $l = 380$ мм; $D = 568$ мм; $h = 4,5$ мм.

Тогда $b = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2 \cdot 284 \cdot 4,5}} = 0,034 \frac{1}{\text{мм}}$ и длина волны

затухания функции $2d = 2p / 0,034 = 184$ мм, т.е. момент затухает на половине длины деформируемой оболочки. Можно сравнить значения соседних максимумов функции:

$$\frac{w_{n-1}}{w_n} = \frac{e^{b(l-x+2d)}}{e^{b(l-x)}} = e^{2db} = e^{2p} \approx 23. \text{ Скорость за-}$$

тухания краевого эффекта очень велика.

ВЫВОДЫ. Данное исследование показало, что момент, действующий на участке свободного изгиба, оказывает влияние на возникновение продольной складки, однако моментная нагрузка носит быстро затухающий характер. Это подтверждено теоретическими исследованиями некоторых частных задач [3], в которых было обнаружено, что указанный процесс в оболочках носит, кроме того, и колебательный характер. Функции, описывающие такие процессы, имеют вид $e^{-kx} f(x)$, где $f(x)$ – ограниченная периодическая функция. Множитель e^{-kx} определяет быстроту затухания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. част. 1. – М.: ОГИЗ, 1948. – 377 с.

DETERMINATION OF THE WAVE LENGTH OF ATTENUATION OF THE BENDING MOMENT AT EXPANSION OF CYLINDRICAL BILLET

R. Puzyr

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

The investigations are directed on reduction of intensity of deformation during the subsequent transitions of profiling for the minimum variation of thickness of wheelrims providing. The theoretical researches of defining of the bending moment operating in the free bending area at expansion of cylindrical billet with conical punch are carried out. It is shown that for determination of the meridional tensions it is necessary to take into account the geometry of the billet and apply the moment-free theory of shells and summation of the edge effect, which considers the influence of the bending moment on the distribution of tension. The results of the investigation allow to conclude that the bending moment distribution along the forming cylindrical surface has a fading oscillatory character and loss of stability occurs owing to the action of the output oscillatory loading of the free bending area.

Key word: rim, punch, tension, deformation, expansion, bending moment, intensity of deformation.

REFERENCES

1. Popov E.A. *Bases of the theory of sheet punching*. – М.: Mechanical engineering, 1977. – 278 p. [in Russian]
2. *The theory of processing of metals by pressure* / M.V. Storogev, E.A. Popov. – М.: Mechanical engineering, 1971. – 421 p. [in Russian]

3. Ильюшин А.А. *Plasticity. Elastoplastic deformation. Part 1*. – М.: OGIЗ, 1948. – 377 p. [in Russian]

Статья надійшла 26.09.2012.

Рекомендована до друку

д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.