

УДК 621.96/98(075)

ФОРМОВКА ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ РИФТОВ УКРОЧЕННЫМ ПУАНСОНОМ**А. А. Черныш**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Рассмотрены трудности, связанные с формовкой крупногабаритных толстолистовых деталей с прямолинейными рифтами. Одна из них связана с образованием гофр на плоских участках заготовки, переходящих в законцовку рифта. Предложено для устранения образования гофр производить формовку укороченным пуансоном. Рассмотрены варианты расчёта радиусов кривизны участка свободного изгиба при формовке укороченным пуансоном. По установленной аналитической зависимости определены радиусы кривизны в меридиональном и широтном сечениях. Рассмотрены варианты возможных решений уравнений равновесия свободно формируемого участка элемента жёсткости. Представлены результаты экспериментальных исследований по формовке прямолинейных рифтов укороченными пуансонами. Определена минимальная длина укороченного пуансона при которой соблюдается размерная точность прямолинейных рифтов. Она составляет 80 % длины рифта без законцовок.

Ключевые слова: толстолистовая заготовка, прямолинейный рифт, законцовка рифта, свободный изгиб, радиус кривизны.

ФОРМУВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНИХ РИФТІВ УКРОЧЕНИМ ПУАНСОНОМ**А. А. Черныш**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна, E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Розглянуті труднощі, пов'язані з формуванням великогабаритних товстолистових деталей з прямолінійними рифтами. Одна з них пов'язана з утворенням гофр на плоских ділянках заготовки, які переходять у законцовку рифту. Запропоновано для усунення утворення гофр виробляти формування укороченим пуансоном. Розглянуто варіанти розрахунку радіусів кривизни ділянки вільного вигину при формуванні укороченим пуансоном. За встановленої аналітичної залежності визначені радіуси кривизни в меридіональному та широтному перетинах. Розглянуто варіанти можливих рішень рівнянь рівноваги вільно формируємої ділянки елемента жорсткості. Приведені результати експериментальних досліджень щодо формування прямолінійних рифтів укороченими пуансонами. Визначена мінімальна довжина укороченого пуансона, за якої дотримується розмірна точність прямолінійних рифтів. Вона становить 80 % довжини рифту без кінцівки.

Ключові слова: товстолистова заготовка, прямолінійний рифт, законцовка рифту, вільний вигин, радіус кривизни.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В конструкциях наземного и воздушного транспорта широко применяются крупногабаритные панели или другие детали с элементами жёсткости, отформованные в виде рельефа из листовых заготовок.

Рельеф таких деталей, как правило, образуется путём изменения толщины заготовки, т.е. формовкой. Теоретические исследования процесса формовки рельефа на плоских листовых заготовках выполнены достаточно глубоко и полно как в отечественной, так и зарубежной литературе [1–6].

Однако некоторые трудности возникают при получении крупногабаритных толстолистовых деталей с прямолинейным и сложным рельефом. Для изготовления таких деталей необходимо использовать мощные штамповочные прессы. Создание и применение последних определяется экономическими условиями и не всегда приемлемо в конкретных производственных условиях. Существуют варианты [7] использования менее мощных прессов. Это штамповка отдельных элементов рифтов, т.е. воздействие деформирующего усилия не на всю площадь заготовки, а на её часть.

В другом случае рельеф формируется последовательно по участкам ограниченного длиной пуансона или другим силовым воздействием.

В первом случае не исключается образование гофров на плоском участке заготовки и в зоне законцовки рифта (рис. 1). Увеличить давление при-

жима не всегда возможно. Более просто уменьшить подтяжку плоского участка детали путём исключения действия деформирующего усилия на элемент законцовки рифта. В этом случае законцовка рифта оформляется самопроизвольно и возникает необходимость в прогнозировании формы элемента рифта.



Рисунок 1 – Отштампованная деталь с гофрами у законцовки рифта

Цель исследования – прогнозирование формы элемента рифта вне действия деформирующего усилия

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При теоретическом анализе процесса формовки элементов жёсткости укороченным пуансоном сле-

дует учитывать, что в процессе реализуются две схемы формоизменения [1]. В схеме первого вида формоизменение заготовки на цилиндрической части рифта полностью определяется формой пуансона. На участке заготовки, соответствующем законцовке рифта, не контактирующем с инструментом, реализуется вторая схема. Расчётные схемы второго вида, основанные на применении теории оболочек согласуются с моментной теорией. В результате расчёта необходимо определить окончательную форму заготовки оформляющей поверхность законцовки прямолинейного рифта.

Для участка, не контактирующего с инструментом, уравнения равновесия описываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx_1}(\rho \cdot N_1) - N_2 \frac{d\rho}{dx_1} + \rho \cdot K_1 \cdot Q_1 &= 0 \\ -\frac{d}{dx_1}(\rho \cdot M_1) + M_2 \frac{d\rho}{dx_1} + \rho \cdot Q_1 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где N_1, N_2, M_1, M_2, Q_1 – внутренние силы и моменты, отнесённые к единице длины; x_1 – линейная координата (меридиональная); K_1, K_2 – главные значения кривизны в меридиональном и широтном направлениях.

Учитывая то, что формируется толстолистовая заготовка, внутренние силы и моменты подсчитываем, исходя из переменного по толщине заготовки напряженно-деформированного состояния. В данном случае зависимость деформаций от линейной координаты (радиальной) x_2 имеет линейный характер [1]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x_1} &= \varepsilon_1 + \Delta k_1 \cdot x_2 \\ \varepsilon_{x_3} &= \varepsilon_2 + \Delta k_2 \cdot x_2 \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta k_1, \Delta k_2$ – изменения главной кривизны в широтном и меридиональном направлениях.

Пространственное положение и форма заготовки определяется параметрами $k_1, k_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ являющимися функциями одной координаты. При расчёте необходимо использовать уравнение (1), интегральные соотношения для внутренних сил и моментов, условие неразрывности, физический закон в рамках теории течения и энергетическое условие пластичности для плоского напряжённого состояния Губера-Мизеса. Из этих уравнений определяются внутренние силы и моменты, меридиональная кривизна, деформации и напряжения. Более точное решение можно получить, основываясь на моментной теории оболочек. В работе [1] получено аналитическое решение задачи изгиба заготовки с деформируемым поперечным сечением. Решение получено в функциях А.Н. Крылова путём лианеризации зависимости

$$\frac{d^2 M_1}{dx_1^2} = \frac{N_2}{r} \quad (3)$$

где M_1 – момент в меридиональном сечении; N_2 – продольная сила в широтном направлении; r – кри-

визна нейтральной поверхности заготовки; x_1 – линейная координата.

Однако результаты расчёта применимы только для определения прогибов (кривизны) в широтном направлении.

В исследованиях В.И. Вершинина [3] показано, что изменение меридиональных и широтных напряжений на участке свободного изгиба (без воздействия контактных напряжений) незначительно. При принятых в работе [1] допущениях, уравнение равновесия для нашего случая (рис. 2) может быть записано в виде

$$R_p^2 \cdot \sigma_t \cdot \sin^2 \alpha + 2R_p \cdot \sigma_p \cdot R_3 \cdot (1 - \cos \alpha) - \sigma_s \cdot S \cdot R_3 = 0, \quad (4)$$

где R_p – радиус меридионального сечения; R_3 – расстояние до радиуса скругления законцовки гофра.

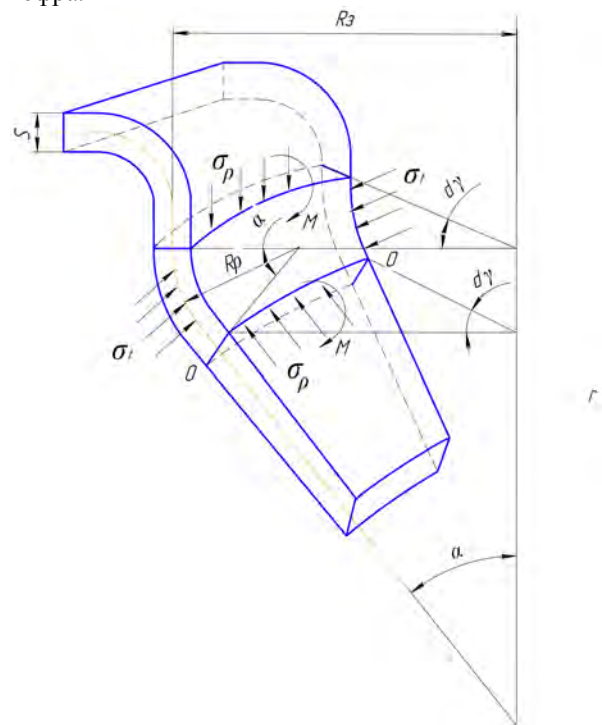


Рисунок 2 – Схема деформирования заготовки на участке свободного изгиба без воздействия контактных напряжений

Однако это выражение позволяет определить радиус кривизны в меридиональном сечении только в частных случаях, а именно, когда или меридиональные или широтные напряжения равны нулю. Для определения радиуса кривизны в общем случае необходимы два дополнительных уравнения – уравнение равновесия на нормаль к элементарной полости и уравнение пластичности для одноимённой схемы напряжённого состояния.

Для плоского напряжённого состояния уравнение пластичности по гипотезе постоянства максимальных касательных напряжений при одноимённой схеме напряжённого состояния имеет вид

$$\sigma_t = \pm \sigma_s \quad (5)$$

Уравнение равновесия на нормаль к свободно деформируемой поверхности, приводится к уравнению Лапласа

$$\frac{\sigma_r}{R} \pm \frac{\sigma_s}{R_3} = 0, \quad (6)$$

где R – радиус кривизны в широтном направлении.

В этом выражении радиус кривизны в широтном направлении принят равным радиусу скругления законцовки рифта. Это вполне допустимо, если выполнить радиус скругления торца пуансона равным радиусу кривизны в широтном сечении.

С учётом этого, выражение для определения радиуса скругления в меридиональном сечении [3] примет вид:

$$\pm R^2 \cdot \sigma_s \cdot \sin^2 \alpha \mp 2R^2 \cdot \sigma_s \cdot (1 - \cos \alpha) = \sigma_s \cdot S \cdot R_3, \quad (7)$$

Отсюда

$$R = \pm \left[\frac{S \cdot R_3}{-\sin^2 \alpha + 2 \cdot (1 - \cos \alpha)} \right]^{0.5}. \quad (8)$$

Подкоренное выражение положительно только при $\sigma_r = +\sigma_s$. После преобразований получаем

$$R = \pm \frac{\sqrt{S \cdot R_3}}{\cos \alpha - 1}. \quad (9)$$

При приближении угла α к $\frac{\pi}{2}$ и 0 значение

$R \rightarrow \infty$, т.е. стремится к прямой, а свободно деформируемая поверхность близка к конической.

Исследования по формовке заготовки имеющей относительно большие размеры по сравнению с

формуемым участком выполнены А.Д. Матвеевым [2]. Однако в этих исследованиях формовка производилась при осевой симметрии деформирования. Общим для этого случая и для формовки рифтов является сосредоточение очага пластической деформации на участке ограниченной кромки матрицы. Наибольшее влияние на характер распределения деформаций оказывает форма пуансона. Кроме того существует оптимальная конфигурация пуансона, обеспечивающая равномерное распределение деформаций и толщин вдоль образующей пуансона.

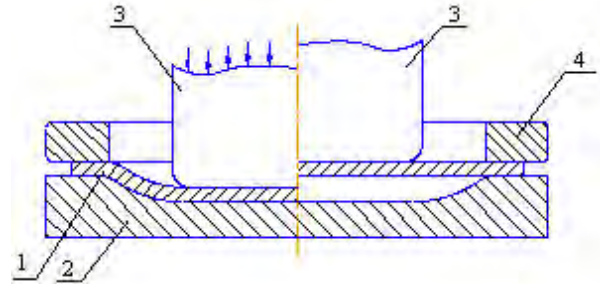


Рисунок – 3 Схема формовки рифта укороченным пуансоном: 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – прижим

В дополнение к этим экспериментам выполнен ряд практических исследований по штамповке рифтов. Схема процесса формовки укороченным пуансоном представлена на рис. 3, технологическая оснастка – на рис. 4, экспериментальные образцы после формовки укороченным пуансоном – на рис. 5.



Рисунок 4 – Оснастка в собранном виде, установленная на прессе и комплект экспериментальной оснастки



Рисунок 5 – Экспериментальные образцы после формовки рифта

В качестве заготовок использовались прямоугольные пластины из стали Ст. 3 толщиной 1 мм, глубина рифта – 5 мм, ширина – 11 мм, давление формовки составило 100 МПа, давление прижима – 50 МПа. При таких параметрах соблюдено геометрическое и силовое подобие. Материал заготовки для штамповки серийных деталей идентичны материалу опытных образцов. Длина формовочных пуансонов в пределах $(0,6-1,0)L_c$, где L_c – длина прямолинейного рифта без законцовок. В экспериментах использовали 12-типоразмеров пуансонов. В процессе формовки первого образца пуансоном длиной $0,8L_c$ наблюдалась полная идентичность формы свободно деформируемого участка заготов-

ки в 10-ти экспериментах. Поэтому формовку остальных заготовок осуществляли по каждому варианту длины пуансона три раза. Форма поверхности свободно деформируемого участка законцовки рифта формируемого пуансоном длиной $0,8 L_c$ конечная. Это в пределах допуска для серийной детали. При меньших длинах пуансона вне очага деформации деформируемая поверхность соответствует поверхности вращения, которая образована цепной линией.

Радиус кривизны в меридиональном сечении, определяемый по зависимости (9) имеет максимальное отклонение от цепной линии при $0,8L_c - L_c$ не превышает 10–18 %.

ВЫВОДЫ. В результате исследований установлено, что кривизну участков заготовки, не контактирующих с инструментом, вполне приемлемо определять из условий равновесия моментов и сил, действующих на элементарную полоску участка свободного изгиба. Предельные отклонения экспериментальных значений радиуса кривизны участка свободного изгиба при длине пуансона, равной длине прямолинейного рифта без законцовок, рассчитанные по полученной зависимости, не превышают 5 % и лежат в пределах допуска на серийно изготавливаемые детали. Таким образом, предотвратить образование гофров при штамповке толстолистовых деталей с прямолинейными рифтами возможно путём формовки укороченным пуансоном, длина которого соответствует длине рифта без законцовок. При этом размеры отформованного рифта соответствуют заданным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вдовин С.И. Методы расчёта и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и

профильных заготовок. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.

2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 280 с.

3. Вершинин В.И. Вытяжка цилиндрических деталей с фланцем // Известия Вузов. Машиностроение. – 1965. – № 11. – С. 120–124.

4. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967. – 368 с.

5. Jounf F. Deep drawing with “rubber dies” // Modern Metals. – 1951. – № 4, vol. 7. – PP. 28–30.

6. Weidemann C. The blank holding action of draw beads // “Sheet metal Forming and Formability. Proc. IDDRG 10 Bienn. Congr., Warnick, 1978”, Red-hill, 1978, pp. 79–85.

7. Драгобецкий В.В. Пути повышения деформируемости слоистых металлических заготовок при обработке давлением // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – Вип. 1/2005 (30). – С. 53–56.

FORMING OF STRAIGHT RIFTS BY A SHORTENED PUNCH

A. Chernysh

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

The difficulties associated with the forming large plate parts with straight rifts are investigated. One of them is related to the formation of corrugations on the flat sections of the work piece, turning into the rift tip. To eliminate the formation of the corrugations it is proposed to do the forming by a shortened punch. The variants of the calculation on the radii of curvature of the free bending area during the forming by a shortened punch are considered. The radii of curvature in the meridional and latitudinal sections are determined from the found analytical dependence. The variants of possible solutions to the equations of equilibrium of the freely formable area of the stiffness member are investigated. The results of the experimental researches on forming straight rifts by a shortened punch are presented. The minimum length of the shortened punch that respects the dimensional accuracy of straight rift is determined. It is 80 per cent of the length of the rift without tips.

Key words: plate part, straight rift, rift tip, free bending, radius of curvature.

REFERENCES

1. Vdovin, S.I. (1988), *Metody raschyota i proektirovaniya na EVM protsessov shtampovki listovyih i profilnyih zagotovok* [Methods of computer calculation and design of sheet stamping processes and profile blanks], Mashinostroenie, Moscow, USSR.

2. Popov, E.A. (1977), *Osnovy teorii listovoy shtampovki* [Fundamentals of the sheet stamping theory], Mashinostroenie, Moscow, USSR.

3. Vershinin, V.I. (1965), "Extractor cylindrical parts with flange", *Izv. Vuzov. Mashinostroenie*, no. 11, pp. 120–124.

4. Isachenkov, E.I. (1967), *Shtampovka rezinoy i zhidkostyu* [Stamping by rubber and liquid], Mashinostroenie, Moscow, USSR.

5. Jounf, F. (1951), "Deep drawing with “rubber dies”, *Modern Metals*, no. 4, vol. 7, pp. 28–30.

6. Weidemann, C. (1978), "The blank holding action of draw beads", *Sheet metal forming and Formability. Proc. IDDRG 10, Bienn. Congr., Warnick, Red-hill*, pp. 79–85.

7. Dragobetskiy, V.V. (2005), "Ways to increase the deformability of layered metal workpieces in the processing pressure", *Transaction of Kremenchuk State Politechnical University*, no. 1 (30), pp. 53–56.

Стаття надійшла 13.02.2015.