

УДК 621.983.044

Розов Ю. Г.

НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ В ОПЕРАЦИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ОБЖИМА И РАЗДАЧИ

Для получения деталей типа втулок методами, основанными на пластическом деформировании металлов, большой интерес представляет использование трубчатых (трубных) заготовок (ТЗ). К очевидным преимуществам процессов формовки деталей из ТЗ можно отнести: высокую экономическую эффективность, возможность механизации и автоматизации, получение деталей с заданными точностью и физико-механическими свойствами и т. д.

Основными формоизменяющими операциями листовой штамповки тонкостенных ТЗ (с относительной толщиной $S_3/R_3 \leq 0,1$, S_3 – толщина стенки, R_3 – радиус заготовки) являются операции: обжима (уменьшение поперечного сечения краевой части полого полуфабриката), раздачи (увеличение поперечных размеров краевой части полого полуфабриката, операция, обратная обжиму). В настоящее время анализу указанных процессов посвящено большое количество работ [1–5], что позволяет сделать вывод о достаточной их изученности. Поэтому расчёт технологических параметров при проектировании данных процессов при изготовлении трубчатых изделий (ТИ) круглого поперечного сечения не должен вызывать серьёзных трудностей. Однако применение указанных методов при изготовлении осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения имеют некоторые особенности. Рассмотрим их.

Большой интерес представляют технологии изготовления осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения (рис. 1, а), образующие профильных элементов которых могут быть параллельными продольной оси изделий (рис. 1, б) или образовывать винтовую поверхность (рис. 1, в). Применение таких изделий в первом случае характерно для изготовления телескопических устройств различного назначения, обеспечивающих прямолинейное перемещение в направлении оси одних частей конструкции относительно других (например, шлицевые соединения или телескопические направляющие роботов и манипуляторов), а во втором – для устройств, в которых осевое перемещение сопровождается вращением вокруг оси.

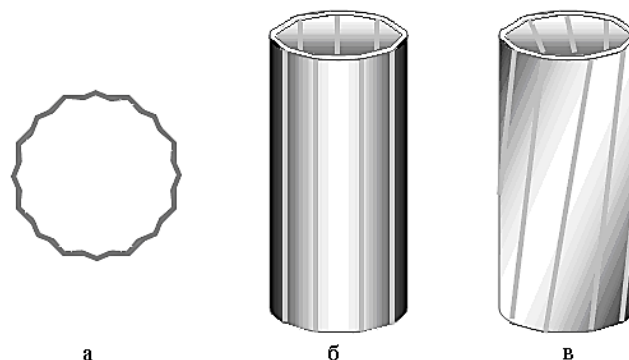


Рис. 1. Примеры длинномерных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения:
а – профиль сечения; б – ТИ с образующими профильных элементов, параллельными продольной оси; в – ТИ с профильными элементами, образующими винтовую поверхность

Для изготовления осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения предлагается формировать профиль сечения методом проталкивания тонкостенной ТЗ в профильный инструмент (рис. 2).

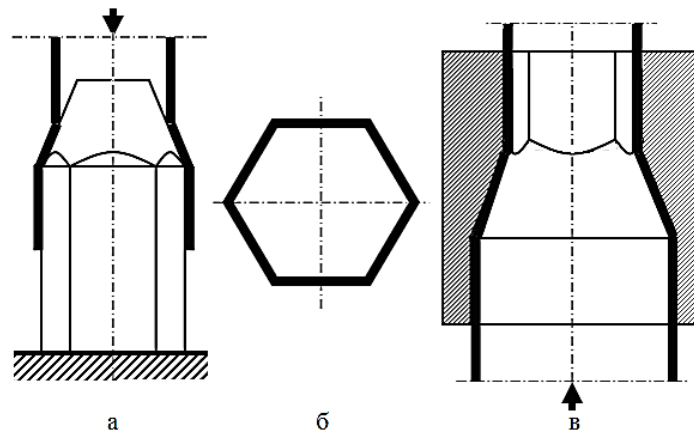


Рис. 2. Проталкивание тонкостенной ТЗ в профильный инструмент:
а – неравномерная раздача; б – профиль сечения ТЗ; в – неравномерный обжим

При проектировании технологии изготовления рассмотренных деталей для расчёта силовых параметров процесса необходимо учесть факторы, влияющие на напряжённое состояние в очаге деформации ТЗ, а также определить коэффициент её формоизменения. Особенно это важно для расчёта меридионального напряжения, определяющего силу проталкивания ТЗ.

Цель работы – рассмотреть особенности и определить величину приращения меридионального напряжения в операциях неравномерного обжима и раздачи, возникающего из-за изгиба стенки деформируемой ТЗ при изготовлении осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения с профильными элементами, параллельными продольной оси, и образующими винтовую поверхность.

Рассмотрим особенности листовой штамповки тонкостенных полых осесимметричных деталей некруглого профиля из ТЗ с применением неравномерного обжима и раздачи на примере получения профиля правильного шестиугольника (рис. 3).

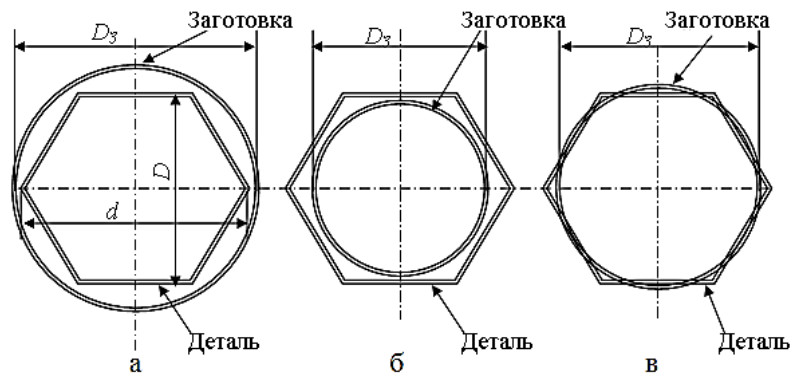


Рис. 3. Сечение ТЗ и детали полигонального тонкостенного профиля

При изготовлении полых деталей некруглого профиля из тонкостенных ТЗ с применением неравномерного обжима и раздачи возможны три схемы деформирования:

1. Неравномерный обжим по всей площади сечения (рис. 3, а);
2. Неравномерная раздача по всей площади сечения (рис. 3, б);
3. Локальное совмещение деформаций обжима и раздачи (рис. 3, в).

Рассмотрим каждую схему деформирования и определим величину формоизменения при этом трубчатой заготовке в операциях обжима, раздачи и их комбинировании.

При деформировании заготовки по первой и второй схемам деформирования, для корректного учёта неравномерной деформации (по периметру) коэффициент формоизменения предлагается определять, как отношение периметров срединной линии поперечных сечений детали и трубчатой заготовки. Для нашего примера:

- периметр заготовки:

$$P_3 = \pi D_3;$$

- периметр детали:

$$P_\partial = 3D \text{ или } P_\partial = 2\sqrt{3}d,$$

Где D_3 – диаметр срединной линии трубчатой заготовки;

D – диаметр описанной окружности сечения детали;

d – диаметр вписанной окружности сечения детали.

Тогда:

- для первой схемы:

$$k_{об} = \frac{P_3}{P_\partial} = \frac{\pi D_3}{3 D} = \frac{\pi D_3}{2\sqrt{3} d}; \quad (1)$$

- для второй схемы:

$$k_{разд} = \frac{P_\partial}{P_3} = \frac{3 D}{\pi D_3} = \frac{2\sqrt{3} d}{\pi D_3}. \quad (2)$$

При деформировании заготовки по третьей схеме необходимо разделить зоны обжима и раздачи, а затем учесть влияние каждой. Для этого определяется (например, графически) отдельно периметр частей детали в зоне обжима и в зоне раздачи (линией раздела является срединная окружность исходной трубчатой заготовки). Затем, определив долю каждой зоны (обжима и раздачи), в той же пропорции к ним соотносится соответствующая доля периметра заготовки и определяется коэффициент формоизменения. Например, соотношение периметра детали в зоне раздачи (60%) к периметру в зоне обжима (40 %) составляет:

$$\frac{P_{разд}}{P_{об}} = \frac{3}{2}, \text{ при этом } P_{об} + P_{разд} = P_\partial.$$

Тогда, коэффициенты формоизменения будут равны:

$$k_{об} = \frac{0,4P_3}{P_{об}}; k_{разд} = \frac{P_{разд}}{0,6P_3}. \quad (3)$$

Затем, используя выражения для определения, например, максимального меридионального напряжения σ_ρ^{\max} , возникающего в стенках деформируемой заготовки, используем выражения, полученные в работах [5, 6 и др.], при подстановке в них значений $k_{об}$ и $k_{разд}$ (формулы 1, 2, 3).

В рассматриваемом процессе деформирования, предусматривающем изготовление полого изделия некруглого профиля, некоторое увеличение меридионального напряжения, определяющего усилие деформирования, произойдет из-за изгиба стенки заготовки для получения тонкостенного сечения полигональной формы. Определим величину приращения меридионального напряжения $\Delta\sigma_\rho$, возникающего в этом случае. При этом примем, что в процессе формирования профиля при обжиме происходит изгиб со сжатием, а при раздаче – изгиб с растяжением. Рассмотрим на примере изгиба с растяжением. На рис. 4 показан фрагмент кромки деформируемой заготовки в месте изгиба стенки.

Для составления уравнений равновесия изобразим выделенный участок на кромке заготовки, единичной длины, образованный двумя секущими плоскостями, проходящими через центр изгиба под углом $d\gamma$ (рис. 5).

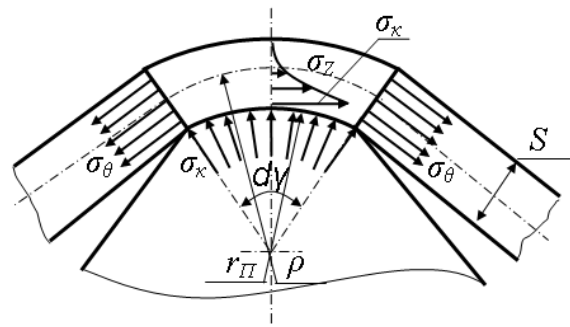


Рис. 4. Расчётная схема сил при изгибе с растяжением

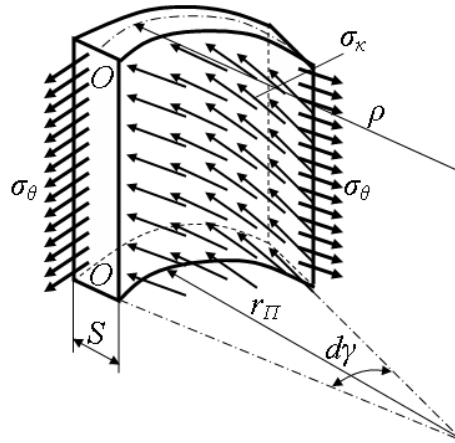


Рис. 5. Расчётная схема для анализа равновесия элемента заготовки в месте изгиба

Составим два уравнения статики: сумма сил, образованных от действия тангенциальных σ_θ и контактных σ_κ (по пуансону, радиусом скругления кромки r_{II}) напряжений (рис. 4), и сумма моментов (рис. 5), действующих на заготовку в месте изгиба, относительно сечения $O-O$ (принимая, что величина изгибающего момента определяется по известной формуле [1]:

$$M = \frac{\sigma_S S^2}{4}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} 2\sigma_\theta S \frac{d\gamma}{2} &= \sigma_\kappa r_{II} d\gamma; \\ \sigma_\theta S(1 - \cos(d\gamma))r_{II} + \sigma_\kappa r_{II} d\gamma r_{II} \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) &= \frac{\sigma_S S^2}{4}. \end{aligned} \tag{4}$$

Из первого уравнения системы (4) определяем величину контактных напряжений:

$$\sigma_\kappa = \sigma_\theta \frac{S}{r_{II}}. \tag{5}$$

Формула (5) позволяет определить минимальный радиус изгиба. С учётом условия пластичности Треска – Сен-Венана для раздачи ($\sigma_\theta - \sigma_\rho = \sigma_S$), а также очевидного неравенства:

$$\sigma_\kappa \leq \sigma_S,$$

получим неравенство, ограничивающее минимальную величину радиуса скругления кромки пуансона (минимальный радиус изгиба):

$$r_{\min} \geq S. \tag{6}$$

Таким образом, даже если радиус скругления пуансона в месте изгиба равен нулю, внутренний радиус изгибаемой заготовки будет равен (или больше) толщине стенки заготовки.

Решая второе уравнение системы (4) совместно с уравнением пластичности, с учётом того, что на кромке деформируемой заготовки при раздате $\sigma_\rho \approx 0$, а при малых значениях угла справедливы равенства:

$$1 - \cos(d\gamma) = \frac{(d\gamma)^2}{2}; \quad \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) = \frac{d\gamma}{2},$$

а также, учитывая полученное выражение для σ_κ (5), после несложных сокращений, получим:

$$d\gamma = \sqrt{\frac{S}{2r_{II}}}. \quad (7)$$

Для дальнейшего анализа, рассмотрим объёмную схему напряжённого состояния.

На рис. 4 показано распределение (эпюра) напряжений σ_Z по толщине заготовки. Очевидно, что напряжения σ_Z меняются от $\sigma_Z = -\sigma_K$ при $\rho = r_{II}$ (на поверхности, контактирующей с пуансоном) до $\sigma_Z = 0$ при $\rho = r_{II} + S$ (на свободной поверхности). Ввиду малости толщины заготовки S , с достаточной степенью точности можно принять, что среднее значение напряжения σ_Z равно:

$$\sigma_Z^{cp} = \frac{\sigma_K}{2}. \quad (8)$$

Для определения величины приращения меридионального напряжения $\Delta\sigma_\rho$ составим уравнение равновесия, устанавливающее связь между меридиональными напряжениями, возникающими в стенках заготовки, и напряжениями σ_Z , распределенными по толщине на кромке заготовки:

$$\Delta\sigma_\rho F_3 = n\mu\sigma_Z^{cp} r_{II} d\gamma S,$$

где $F_3 = 2\pi R_3 S_3$,

n – количество углов многоугольника сечения заготовки (например, для шестиугольника (рис. 2), $n = 6$);

μ – коэффициент трения.

Тогда, решая последнее равенство относительно $\Delta\sigma_\rho$, с учётом равенств (7) и (8), условия пластичности, пренебрегая изменением толщины заготовки (погрешность при этом небольшая, а решение значительно упрощается), получим:

$$\Delta\sigma_\rho = n \frac{\mu}{4\pi} \frac{S_3}{R_3} \sqrt{\frac{S_3}{2r_{II}}} \sigma_S. \quad (9)$$

При рассмотрении процесса формирования профиля при обжиме (изгиб со сжатием), можно получить аналогичные выражения. В этом случае приращение $\Delta\sigma_\rho$ будет равно:

$$\Delta\sigma_\rho = n \frac{\mu}{4\pi} \frac{S_3}{R_3} \sqrt{\frac{S_3}{2r_M}} \sigma_S, \quad (9')$$

где r_M – радиус скругления внутренней поверхности матрицы.

При радиусах скругления пуансона или матрицы равным или меньше толщины заготовки ($r_{II} \leq S_3; r_M \leq S_3$) предлагается в формулах (9) и (9') использовать равенства $r_{II} = r_M = S_3$. Тогда формулы (9) и (9') выразятся в виде:

$$\Delta\sigma_\rho = \frac{1}{\sqrt{2}} n \frac{\mu}{4\pi} \frac{S_3}{R_3} \sigma_S. \quad (9'')$$

Если осесимметричный некруглый тонкостенный профиль (например, сечение полигонального типа) извивается вдоль оси по винтовой линии с некоторым углом наклона α_1 (см. рис. 6), то формула для определения приращения меридионального напряжения $\Delta\sigma_\rho$ в этом случае запишется:

- при раздате (изгиб с растяжением):

$$\Delta\sigma_\rho = n \frac{1}{4\pi} (\mu \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) \frac{S_3}{R_3} \sqrt{\frac{S_3}{2r_{II}}} \sigma_S; \quad (10)$$

- при обжиме (изгиб со сжатием):

$$\Delta\sigma_\rho = n \frac{1}{4\pi} (\mu \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) \frac{S_3}{R_3} \sqrt{\frac{S_3}{2r_M}} \sigma_S; \quad (10')$$

- при $r_{II} \leq S_3; r_M \leq S_3$:

$$\Delta\sigma_\rho = \frac{1}{\sqrt{2}} n \frac{1}{4\pi} (\mu \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) \frac{S_3}{R_3} \sigma_S. \quad (10'')$$

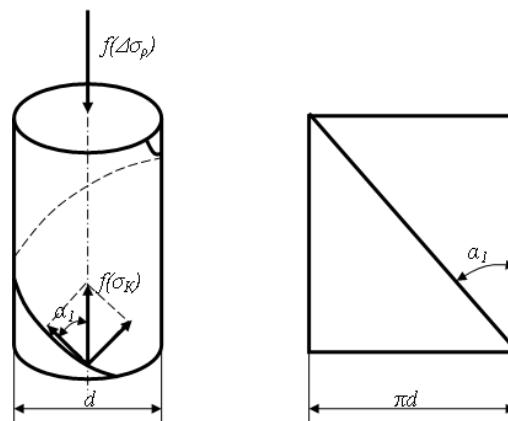


Рис. 6. Расчётная схема для определения $\Delta\sigma_\rho$ при деформировании профиля по винтовой линии

Очевидно, что при $\alpha_1 = 0$ (прямой профиль вдоль оси) формулы (10), (10') и (10'') принимают вид, соответственно, (9), (9') и (9'').

Необходимо отметить, что при изготовлении осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения с профильными элементами, параллельными продольной оси, и образующими винтовую поверхность, необходимо проводить проверку на устойчивость деформируемой ТЗ [7–9].

ВЫВОДЫ

Предложена методика расчёта коэффициентов формоизменения ТЗ в операциях неравномерного обжима и раздачи при изготовлении осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого профиля.

Получены формулы для расчёта и определены факторы, влияющие на величину приращения меридионального напряжения в операциях неравномерного обжима и раздачи, возникающего из-за изгиба стенки деформируемой ТЗ при изготовлении осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого поперечного сечения с профильными элементами, параллельными продольной оси, и образующими винтовую поверхность.

Определена величина минимального радиуса изгиба стенки в поперечном сечении деформируемой ТЗ в операциях неравномерного обжима и раздачи при изготовлении осесимметричных тонкостенных ТИ некруглого профиля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
3. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Розов Ю. Г. Аналіз НДС початкової стадії обтиску-роздачі / Ю. Г. Розов, В. І. Стеблук // Прогресивна техніка і технологія – 2004 : тези доповідей V Міжнародній науково-практичній конференції, 24–28 черв. 2004 р., Севастополь.
5. Розов Ю. Г. Напружено-деформований стан трубчатої заготовки при обтиску-роздачі інструментом сталі кривизни / Ю. Г. Розов // Прогресивна техніка і технологія – 2004 : тези доповідей V Міжнародній науково-практичній конференції, 24–28 черв. 2004 р., Севастополь.
6. Розов Ю. Г. НДС трубчатой заготовки в совмещенных операциях обжима-раздачи / Ю. Г. Розов // Труды международной научно-технической конференции «Новые наукоемкие технологии, оборудование и оснастка для обработки материалов давлением». – Краматорск, 2004. – С. 44–49.
7. Розов Ю. Г. К вопросу об осевой устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки в области упругих деформаций / Ю. Г. Розов // Вестник ХГТУ. Инженерные науки. – 2002. – № 3(16). – С. 262–264.
8. Розов Ю. Г. Анализ и виды потери продольной устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки при осевом сжатии / Ю. Г. Розов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 6 (92). – С. 11–18.
9. Розов Ю. Г. Анализ процесса возникновения продольных складок при обжиме тонкостенных цилиндрических оболочек / Ю. Г. Розов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 140–146.

REFERENCES

1. Popov E. A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki* / E. A. Popov. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 278 s.
2. Romanovskij V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke* / V. P. Romanovskij. – L. : Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
3. Averkiev Ju. A. *Tehnologija holodnoj shtampovki* / Ju. A. Averkiev, A. Ju. Averkiev. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 304 s.
4. Rozov Ju. G. *Analiz NDS pochatkovoї stadiї obtisku-rozdachi* / Ju. G. Rozov, V. I. Stebljuk // *Progresivna tehnika i tehnologija – 2004 : tezi dopovidej V Mizhnarodnij naukovo-praktichnij konferencii, 24–28 cherv. 2004 r., Sevastopol'.*
5. Rozov Ju. G. *Napruzhenodeformovaniy stan trubchatoї zagotivli pri obtisku-rozdachi instrumentom staloi krivizni* / Ju. G. Rozov // *Progresivna tehnika i tehnologija – 2004 : tezi dopovidej V Mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii, 24–28 cherv. 2004 r., Sevastopol'.*
6. Rozov Ju. G. *NDS trubchatoj zagotovki v sovmeshhennyh operacijah obzhima-razdachi* / Ju. G. Rozov // *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Novye naukoemkie tehnologii, oborudovanie i osnastka dlja obrabotki materialov davleniem».* – Kramatorsk, 2004. – S. 44–49.
7. Rozov Ju. G. *K voprosu ob osevoj ustojchivosti tonkostennoj cilindricheskoy obolochki v oblasti uprugih deformatsij* / Ju. G. Rozov // *Vestnik HGTU. Inzhenernye nauki.* – 2002. – № 3(16). – S. 262–264.
8. Rozov Ju. G. *Analiz i vidy poteri prodol'noj ustojchivosti tonkostennoj cilindricheskoy obolochki pri osevom szhatii* / Ju. G. Rozov // *Visnik Kiivs'kogo nacional'nogo univer-sitetu tehnologij ta dizajnu.* – 2015. – № 6 (92). – S. 11–18.
9. Rozov Ju. G. *Analiz processa vozniknovenija prodol'nyh skladok pri obzhime tonkostennyh cilindricheskikh obolochek* / Ju. G. Rozov // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2016. – № 1 (42). – S. 140–146.

Розов Ю. Г. – д-р техн. наук, проф. ХНТУ.

ХНТУ – Херсонский национальный технический университет, г. Херсон.

E-mail: rozov.yg@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 15.03.2018 г.