

УДК 621.983.044

Розов Ю. Г.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ СКЛАДОК ПРИ ОБЖИМЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Одной из основных формоизменяющих операций листовой штамповки полых цилиндрических тонкостенных заготовок ($S/D \leq 0,1$) является операция обжима осесимметричных деталей.

В настоящее время анализу указанных процессов посвящено большое количество работ [1–3 и др.], что позволяет сделать вывод о достаточной их изученности.

В то же время, некоторые вопросы, связанные с деформированием тонкостенных цилиндрических оболочек, в частности изучение механизмов и определение условий, ограничивающих процесс деформации, например, в связи с различными видами потери устойчивости заготовки, недостаточно изучены. Одной из причин, ограничивающих использование операций обжима тонкостенных цилиндрических оболочек в металлообрабатывающей промышленности, является потеря устойчивости заготовок в процессе деформирования, заключающаяся в возникновении продольных складок в зоне деформации (рис. 1).



Рис. 1. Возникновение продольной складки в зоне деформации при обжиге тонкостенной трубчатой заготовки

Факторы, оказывающие влияние на процесс продольного складкообразования, к сожалению, до настоящего времени изучены недостаточно, а рекомендации по осуществлению обжима без ограничений носят приближённый характер и не подкреплены соответствующими аналитическими зависимостями, удобными для инженерных расчётов, или, наоборот, имеют точные, но достаточно сложные решения [4, 5], что затрудняет их практическое использование.

С целью получения простых аналитических зависимостей, проведём теоретический анализ процесса обжима тонкостенной цилиндрической оболочки в матрицах с конической и криволинейной образующими, основное внимание в котором уделим определению предельных условий, при которых вероятно образование продольных складок.

Обжим в конической матрице.

Рассмотрим равновесие бесконечно малого элемента заготовки, деформируемой в конической матрице под углом α на кромке, ограниченного центральным элементарным углом

$d\gamma$, длина образующей которого равна $\frac{dr}{\sin \alpha}$ (рис. 2).

Примем, что нормальные напряжения σ_K , действующие на контактной поверхности рассматриваемого участка, и тангенциальные напряжения σ_θ , действующие по боковым поверхностям выделенного элемента, распределены равномерно. Примем также, что кривизна срединной поверхности в широтном направлении в месте образования продольной складки определяется действием изгибающего момента \dot{I} и сил, образованных напряжениями $\sigma_{\hat{E}}$ и σ_θ и что величина этой кривизны определяется условием равенства момента \dot{I} и моментов, создаваемых элементарными силами, образованными напряжениями $\sigma_{\hat{E}}$ и σ_θ . Для определения изгибающего момента \dot{I} используем формулу в виде [1]:

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

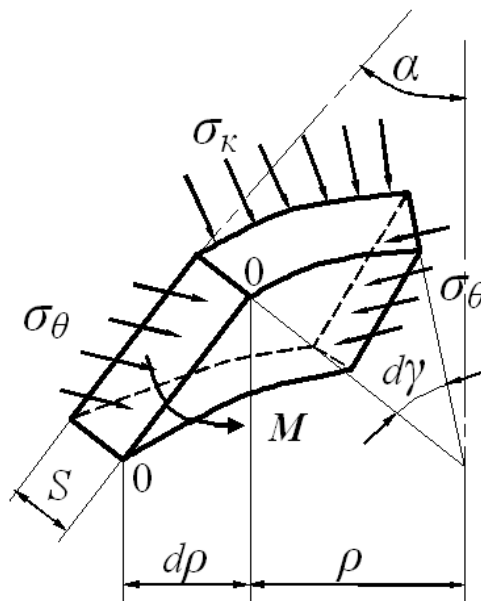


Рис. 2. Расчётная схема бесконечно малого элемента на кромке трубчатой заготовки, деформируемой в конической матрице

Уравнение равновесия, выраженное через моменты относительно сечения 0-0, выразится:

$$\sigma_\theta \frac{dp}{\sin \alpha} S(1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos \alpha} + S \frac{\sigma_\theta}{\rho} \cos \alpha \frac{dp}{\sin \alpha} d\gamma \rho \rho \operatorname{tg} \left(\frac{d\gamma}{2} \right) + \frac{\sigma_S S^2}{4} \frac{dp}{\sin \alpha} = 0. \quad (1)$$

Подставив (при малых значениях угла $d\gamma$):

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

с учётом условия пластичности Треска-Сен-Венана $\sigma_\theta = -\sigma_S$, и решая относительно $d\gamma$, получим:

$$d\gamma = \sqrt{\frac{S}{2\rho} \frac{\cos \alpha}{1 + \cos^2 \alpha}}. \quad (2)$$

Определим условия, при которых возможно возникновение продольных складок, для чего рассмотрим потерявший устойчивость край заготовки со сформировавшимися складками, имеющими минимально возможную длину полуволны (рис. 3).

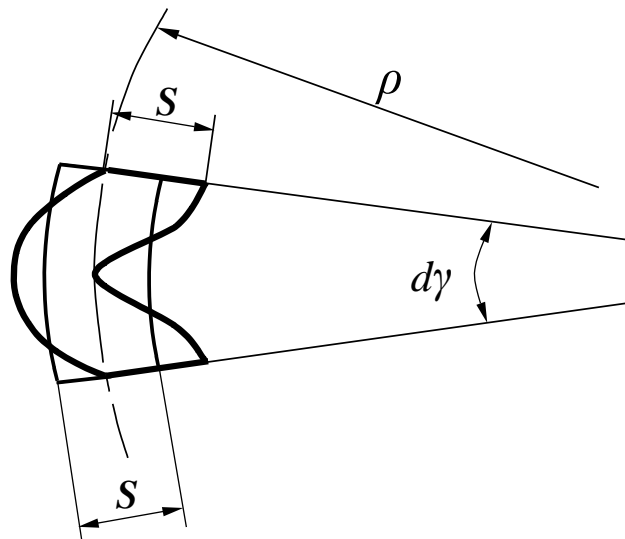


Рис. 3. Форма потерявшего устойчивость края трубчатой заготовки (возникновение складки)

Принимая постоянство площади сечения краевой части заготовки на протяжении всего процесса складкообразования, ввиду его кратковременности, определим площадь сечения одной полуволны складки $F_{СКЛ}$ (допускаем, при этом, что полуволна принимает форму полукруга).

С учётом рис. 3:

$$F_{СКЛ} = \frac{1}{2} \pi S^2 + 2 \frac{1}{4} \pi S^2 = \pi S^2.$$

С учётом принятого постоянства площади сечения, определим длину в широтном направлении элемента края заготовки толщиной S , из которого формируется складка (на рис. 3 изображён тонкой линией).

С учётом принятых обозначений:

$$d\gamma\rho = \frac{F_{СКЛ}}{S} = \pi S.$$

Очевидно, что возникновение продольных складок в деформированной части заготовки возможно при выполнении условия:

$$d\gamma\rho \geq \pi S. \quad (3)$$

С учётом (2):

$$\sqrt{\frac{\rho S}{2} \frac{\cos \alpha}{1 + \cos^2 \alpha}} \geq \pi S. \quad (4)$$

Решая последнее неравенство относительно $\cos \alpha$, получим:

$$\cos \alpha \geq 2\pi^2 \frac{S}{\rho}. \quad (5)$$

Ввиду того, что ρ и S - размеры заготовки на кромке в зоне обжима и очевидны соотношения $\rho < R_3$; $S > S_3$, условия устойчивости заготовки могут быть представлены в виде:

$$\cos \alpha < 2\pi^2 \frac{S_3}{R_3} \quad \text{или} \quad \frac{S_3}{R_3} > \frac{\cos \alpha}{2\pi^2}. \quad (6)$$

Условия устойчивости, выраженные неравенствами (6), не учитывают влияние трения на процесс образования продольных складок в очаге деформации. Однако опытами установлено, что вероятность продольного складкообразования увеличивается с уменьшением коэффициента трения и наоборот [1–3]. Это объясняется тем, что силы трения затрудняют тангенциальное смещение элементов заготовки в зоне обжима и, следовательно, затрудняют об-

разование продольных складок.

С учётом сил контактного трения, уравнение равновесия (1) выразится:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} S(1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos(\alpha)} - \mu S \frac{\sigma_{\theta}}{\rho} \cos(\alpha) \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} d\gamma \rho (1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos(\alpha)} + \\ + S \frac{\sigma_{\theta}}{\rho} \cos(\alpha) \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} d\gamma \rho \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) + \frac{\sigma_S S^2}{4} \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

или после сокращений:

$$(d\gamma)^2 \frac{1}{\cos(\alpha)} - (d\gamma)^3 \mu + (d\gamma)^2 \cos(\alpha) - \frac{S}{2\rho} = 0.$$

Придерживаясь принятой ранее методики, приняв допущения, с некоторым преувеличением степени влияния сил трения, получим условия устойчивости заготовки, с учётом влияния трения, в виде:

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S}{\rho}}{1 + \mu 2\pi^2 \frac{S}{\rho}} \quad \text{или} \quad \frac{S}{\rho} > \frac{\cos(\alpha)}{2\pi^2(1 - \mu \cos(\alpha))}, \quad (8)$$

или по аналогии с неравенствами (6):

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}}{1 + \mu 2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}} \quad \text{или} \quad \frac{S_3}{R_3} > \frac{\cos(\alpha)}{2\pi^2(1 - \mu \cos(\alpha))}. \quad (9)$$

Полученные неравенства (8) и (9) подтверждают описанное выше влияние сил трения на тангенциальное смещение элементов заготовки относительно инструмента и, как следствие, на вероятность образования продольных складок.

Обжим в матрице с криволинейной образующей постоянной кривизны ($R_{\rho} = \text{const}$).

Уравнение равновесия бесконечно малого элемента заготовки на кромке, ограниченного центральным элементарным углом $d\gamma$, длина образующей которого равна $R_{\rho} d\alpha$ (рис. 4):

$$\sigma_{\theta} R_{\rho} d\alpha S(1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos(\alpha)} + S \left(\frac{\sigma_{\theta}}{\rho} \cos(\alpha) + \frac{\sigma_{\rho 0}}{R_{\rho}} \right) d\alpha d\gamma \rho \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) + \frac{\sigma_S S^2}{4} R_{\rho} d\alpha = 0, \quad (10)$$

где для определения меридионального напряжения $\sigma_{\rho 0}$, действующего на краю деформируемой части заготовки (где, как известно, $\sigma_{\rho 0} \approx 0$), учитываем только изменение кривизны элемента заготовки в меридиональном сечении от нуля до $\frac{1}{R_{\rho}}$ [1]:

$$\sigma_{\rho 0} = \frac{\sigma_S S}{4R_{\rho}}$$

Тогда, подставив (при малых значениях угла $d\gamma$):

$$\begin{aligned} 1 - \cos(d\gamma) &= \frac{(d\gamma)^2}{2}, \\ \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) &= \frac{d\gamma}{2}, \end{aligned}$$

с учётом условия пластичности $\sigma_{\theta} = -\sigma_S$, и решая относительно $d\gamma$, получим:

$$d\gamma = \frac{S \cos(\alpha)}{\sqrt{2\rho \left(1 + \cos^2(\alpha) - \cos(\alpha) \frac{S\rho}{4R_\rho^2} \right)}}$$

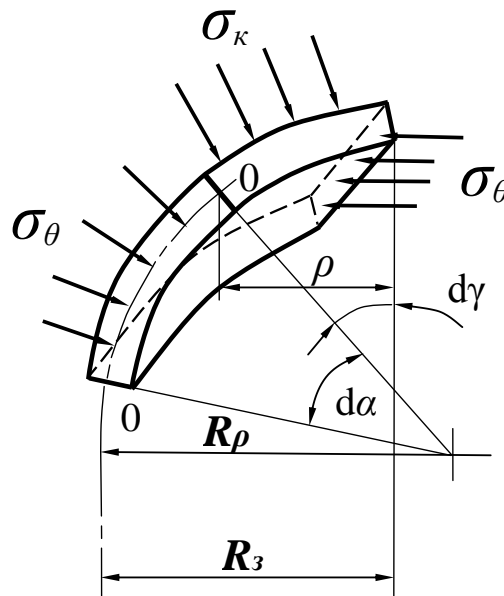


Рис. 4. Расчётная схема бесконечно малого элемента на кромке трубчатой заготовки, деформируемой в криволинейной матрице

По аналогии с анализом процесса деформирования в конической матрице, определяем условия устойчивости заготовки по условию образования продольных складок, выраженные через переменный угол α :

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S}{\rho}}{1 + \frac{1}{2}\pi^2 \frac{S^2}{R_\rho^2}} \text{ или } \frac{S}{\rho} > \frac{2}{\cos^3(\alpha)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\pi} \right)^2} \right], \quad (11)$$

где (рис. 5) $\cos(\alpha) = \frac{R_\rho - R_3 + \rho}{R_\rho}$.

При выводе последнего неравенства принято допущение $R_\rho = \frac{\rho}{\cos(\alpha)}$, несколько уменьшающее степень влияния меридиональных напряжений.

С учётом исходных размеров трубчатой заготовки, условия устойчивости выразятся:

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}}{1 + \frac{1}{2}\pi^2 \frac{S_3^2}{R_\rho^2}} \text{ или } \frac{S_3}{R_3} > \frac{2}{\cos^3(\alpha)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\pi} \right)^2} \right], \quad (12)$$

где $\cos(\alpha) = \frac{R_\rho - R_3 + r_0}{R_\rho}$.

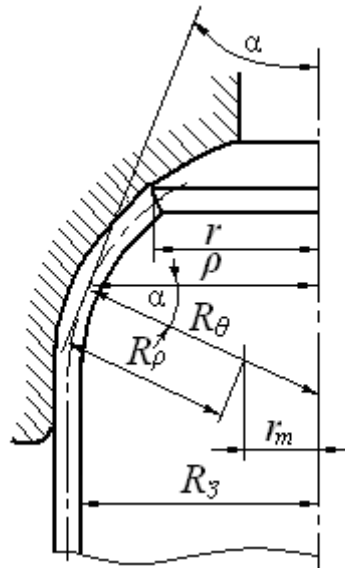


Рис. 5. Расчётная схема при деформировании полой заготовки в матрице с криволинейной образующей

С учётом влияния трения (придерживаясь принятой ранее методики), условия устойчивости выразятся (в данном случае преувеличение степени влияния сил трения компенсирует принятое при выводе формулы (11) допущение, уменьшающее степень влияния меридиональных напряжений):

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}}{1 + \pi^2 \left(\frac{1}{2} \frac{S_3^2}{R_\rho^2} + 2\mu \frac{S_3}{R_3} \right)}$$

или

$$\frac{S_3}{R_3} > \frac{2}{\cos^3(\alpha)} \left(1 - \left[\sqrt{(1 - \mu \cos(\alpha))^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\pi} \right)^2} + \mu \cos(\alpha) \right] \right), \quad (13)$$

$$\text{где } \cos(\alpha) = \frac{R_\rho - R_3 + r_0}{R_\rho}.$$

Проверка выполнения условий устойчивости с помощью неравенств (12) и (13) проводится в следующей последовательности: по заданным размерам заготовки (S_3 , R_3), детали (r_0), матрицы (R_ρ) и значению коэффициента трения μ (при использовании неравенств (13)) определяются левые и правые части неравенств (12), (13) и проверяется их выполнение (в случае невыполнения неравенств, рекомендуется увеличить относительную толщину заготовки $\frac{S_3}{R_3}$ или использовать матрицу с меньшим радиусом кривизны образующей R_ρ).

ВЫВОДЫ

1. Полученные в результате теоретического анализа зависимости удобны для инженерных расчётов и учитывают влияние различных факторов на процесс потери устойчивости с образованием продольных складок в очаге деформации при обжиме тонкостенных цилиндрических оболочек в матрицах с конической и криволинейной образующими.

2. Вероятность образования продольных складок уменьшается с увеличением коэффициента трения, так как при этом затрудняется тангенциальное смещение элементов заготовки относительно инструмента.

3. Вероятность образования продольных складок меньше при обжиге трубчатой заготовки в матрице с криволинейной образующей. Это объясняется тем, что в этом случае элементы заготовки прижимаются к поверхности матрицы действием как тангенциального σ_θ , так и меридионального σ_ρ напряжений.

4. Анализ неравенства (5) позволяет сделать вывод, что вероятность образования продольных складок возрастает с увеличением разнотолщинности стенки трубчатой заготовки в тангенциальном (широтном) направлении (локальное уменьшение толщины S_3 приводит, в свою очередь, к уменьшению правой части неравенства (5), что даёт основание делать подобный вывод).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Е. А. *Основы теории листовой штамповки* / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. *Справочник по сопротивлению материалов* / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. В. В. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Наукова думка, 1988. – 736 с.
3. Аверкиев Ю. А. *Об определении наибольшей степени деформации при обжиге пустотелых цилиндрических заготовок в конической матрице* / Ю. А. Аверкиев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1966. – № 11. – С. 19–22.
4. Пилипенко О. В. *Об образовании поперечных и продольных волн при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала* / О. В. Пилипенко, А. А. Жарков, А. Е. Феофанова // *Известия Тульского государственного университета. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением*. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2006. – Вып. 3. – С. 80–88.
5. Матафонов С. С. *Поперечная устойчивость разностенных заготовок при обжиге в ступенчатых конических матрицах* / С. С. Матафонов // *Известия МГТУ «МАМИ». Серия 2. Технология машиностроения и материалы*, 2013. – № 2 (16). – Т. 2. – С. 145–149.

REFERENCES

1. Popov E. A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki* / E. A. Popov. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 278 s.
2. *Spravochnik po soprotivleniju materialov* / G. S. Pisarenko, A. P. Jakovlev, V. V. Matveev ; otv. red. V. V. Pisarenko. – 2-e izd., pererab. i dop. – K. : Naukova dumka, 1988. – 736 s.
3. Averkiev Ju. A. *Ob opredelenii naibol'shej stepeni deformacii pri obzhime pustotelyh cilindricheskikh zagotovok v konicheskoi matrici* / Ju. A. Averkiev // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. – 1966. – № 11. – S. 19–22.
4. Pilipenko O. V. *Ob obrazovanii poperechnyh i prodol'nyh voln pri obzhime trubnoj zagotovki iz anizotropnogo materiala* / O. V. Pilipenko, A. A. Zharkov, A. E. Feofanova // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela i obrabotka metallov davleniem*. – Tula : Izd-vo TulGU, 2006. – Vyp. 3. – S. 80–88.
5. Matafonov S. S. *Poperechnaja ustojchivost' raznostennyh zagotovok pri obzhime v stupenchatyh konicheskikh matricah* / S. S. Matafonov // *Izvestija MGTU «MAMI». Serija 2. Tehnologija mashinostroenija i materialy*, 2013. – № 2 (16). – T. 2. – S. 145–149.

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

ХНТУ – Херсонский национальный технический университет, г. Херсон.

E-mail: rozovu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.03.2016 г.