

УДК 621.73

Кухарь В. В.

СМЕЩЕННЫЙ ОБЪЕМ И СТЕПЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ПРОФИЛЯ ЗАГОТОВКИ ПРОДОЛЬНЫМ ИЗГИБОМ

Для цилиндрической заготовки возникновение продольного изгиба связано с потерей устойчивости при сжатии, когда отношение диаметра D_0 к высоте L_0 заготовки (т. е. коэффициент контакта D_0 / L_0) меньше определенной критической величины. В случаях осадки или высадки заготовок чаще оперируют обратным соотношением $m_0 = L_0 / D_0$ [1], т. е. относительной высотой заготовки.

Аналитически [2] и на основе результатов конечно-элементного моделирования [3] установлено, что при продольном изгибе зона сжатия в поперечных сечениях заготовки всегда больше зоны растяжения. В процессах осадки и высадки продольный изгиб исключают путем отрезки заготовок с относительной высотой m_0 , меньшей критической величины m_{kr} . В способах восстановления длинномерных деталей осадкой В. А. Огородников [4] и Д. В. Хван [5] на основе энергетического метода определили условия появления продольного изгиба и предложили решения проблемы обеспечения устойчивости формоизменения за счет введения промежуточных термообработок между стадиями ступенчатой осадки или использования специализированного инструмента. Исследования течения металла на переходах высадки заготовок с $m_0 > 3,5$ в ручьях горизонтально-ковочных машин (ГКМ) проводили Е. И. Семенов, И. С. Зиновьев, А. Х. Грайфер, А. Г. Овчинников, А. Д. Томлёнов, Л. С. Зисерсон и др. При этом установлено, что изогнутая ось заготовки формируется в соответствии с механикой двусторонней заделки стержня, а величины критических отношений m_{kr} находятся в пределах от 2,5 до 3,76.

В условиях Херсонского завода карданных валов, по предложению К. К. Диамантопуло, явление продольного изгиба было положительно использовано для рационализации технологии штамповки поковок с изогнутой осью [7]. Продольный изгиб, проводимый параллельными плитами, обеспечивает за один ход пресса, сбив окалины, гибку и предпочтительное перераспределение металла по длине заготовки [8]. Это способствует благоприятному формообразованию поковок в штамповочных ручьях, причем в некоторых случаях достигают экономии металла до 53 % на каждой поковке.

Продольный изгиб рассматривают как совокупность одновременно происходящих процессов формообразования бокового профиля полуфабриката и изгиба заготовки. При этом теоретическую оценку степени профилирования следует проводить на основе использования метода смещенного объема, успешно примененного для анализа формообразования профилей в многовалковых калибрах [9], а деформации изгиба могут быть определены на основе общепринятых инженерных подходов, изложенных, например, в работе [10]. Комплексный анализ изменения степеней деформации профилирования и изгиба при изучаемом способе безручьевого подготовки заготовок [11] до настоящего времени не проведен.

Целью настоящей работы является развитие теоретических основ профилирования заготовок продольным изгибом с точки зрения определения реальных степеней деформации, отвечающих за формообразование профиля полуфабриката.

Развертку изогнутой заготовки, профилированной продольным изгибом, рассматривали в виде суммы объемов [8]:

$$V_{заг} = \pi D_0^2 L_0 / 4 = V_{ц. min} + V_{бок} , \quad (1)$$

где $V_{u.min} = \pi D_{min}^2 L_k / 4$ – объем условной цилиндрической части с размерами, соответствующими минимальному диаметру D_{min} и конечной длине L_k развертки профилированной заготовки;

$V_{бок} = \pi \cdot D_C \cdot F_{бок} / 2$ – объем боковой части (объем профиля), находимый по правилу Гюльдена-Паппуса, ограниченный контурами функции радиальных перемещений.

Величину D_C в выражении (1) определяли по значениям максимального D_{max} и минимального D_{min} диаметров изогнутой заготовки [8]:

$$D_C = 0,1852D_{max} + 0,8148D_{min} . \tag{2}$$

В результате рассмотрения задачи распределения металла вдоль развертки заготовки получено выражение для вычисления объема бокового профиля [8]:

$$V_{бок} = \pi \frac{D_C}{2} \cdot \frac{L_k}{4} (D_{max} - D_{min}) = \frac{\pi D_0^2}{4} L_0 - \frac{\pi D_{min}^2}{4} L_k . \tag{3}$$

Для расчета основных макропоказателей формоизменения получены эмпирические формулы [8], при этом условную степень деформации, как технологический параметр процесса, характеризующий рабочий ход инструмента, определяли как:

$$\varepsilon_y = \frac{L_0 - H_k}{L_0} = \frac{\Delta H}{L_0} , \tag{4}$$

где H_k и ΔH – конечная высота заготовки после осадки с продольным изгибом заготовки и рабочий ход инструмента соответственно.

Схема нагружения при продольном изгибе соответствует гибке с приложением осевой сжимающей силы, действие которой приводит к тому, что волокна со стороны внешнего радиуса профилированной заготовки могут находиться в сжатом состоянии (рис. 1). Величины и знаки деформаций крайних волокон в поперечном сечении по биссектрисе угла изгиба заготовки, при прочих равных условиях, зависят от значений ε_y и m_0 .

Для вычисления степени деформации по методу смещенного объема рассматривали развертку профилированной заготовки, которая имеет сформированные минимальный D_{min} и максимальный D_{max} диаметры (рис. 2). Для нахождения смещенного объема контур начальной заготовки с габаритными размерами L_0 и D_0 центрировано наносили на контур развертки профилированной заготовки, при этом, ввиду симметричности, рассматривали только четверть профиля (рис. 2).

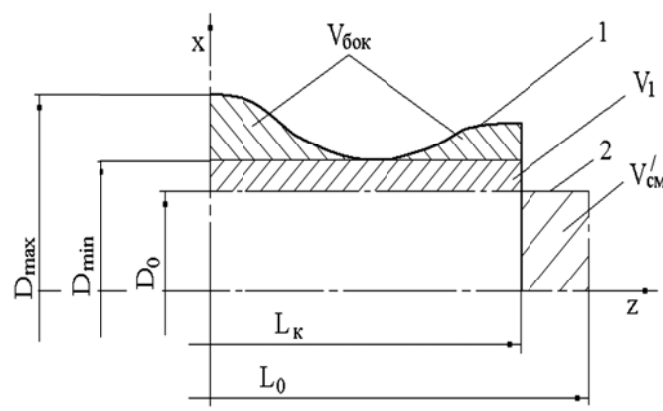
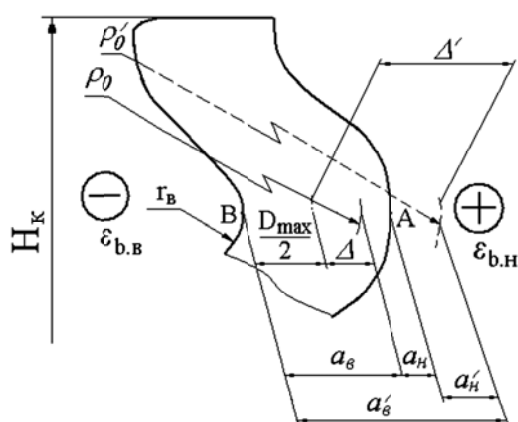


Рис. 1. Схема к расчету деформаций крайних волокон при продольном изгибе

Рис. 2. Схема к расчету смещенного объема заготовки, профилированной продольным изгибом (1/4 развертки заготовки):

- 1 – контур профилированной заготовки;
- 2 – контур начальной заготовки

В процессе продольного изгиба происходит укорочение оси заготовки, относительное значение которого вычисляют в относительных единицах или в процентах соответственно:

$$\delta = (L_0 - L_k) / L_0 \quad \text{или} \quad \delta = [(L_0 - L_k) / L_0] \times 100\% . \quad (5)$$

Величину смещенного объема $V'_{см}$ (см. рис. 2) находили как:

$$V'_{см} = \frac{\pi D_0^2}{4} (L_0 - L_k) . \quad (6)$$

Тогда, с учетом (5), получили:

$$V'_{см} = \frac{\pi D_0^2}{4} [L_0 - L_0(1 - \delta)] = \frac{\pi D_0^2}{4} L_0 \cdot \delta = V_{заг} \cdot \delta . \quad (7)$$

Смещенный объем перераспределяется по длине развертки заготовки в объем бокового профиля $V_{бок}$ и объем условной трубчатой области V_1 , т. е.:

$$V''_{см} = V_{бок} + V_1 \quad (8)$$

Объем бокового профиля представляет собой величину:

$$V_{бок} = \frac{\pi}{4} (D_0^2 L_0 - D_{min}^2 L_k) , \quad (9)$$

или, с учетом (5), после преобразований окончательно имеем:

$$V_{бок} = V_{заг} [1 - k_1^2 (1 - \delta)] , \quad (10)$$

где $k_1 = D_{min} / D_0$ – относительный минимальный диаметр, вычисляемый как:

$$k_1 = \frac{D_{min}}{D_0} = A_d'' m_0^3 + B_d'' m_0^2 + C_d'' m_0 + D_d'' , \quad (11)$$

здесь $A_d'' = 1,0677 \cdot \varepsilon_y^3 + 0,1951 \cdot \varepsilon_y^2 - 0,4685 \cdot \varepsilon_y + 0,0706$;

$B_d'' = -15,485 \cdot \varepsilon_y^3 - 3,415 \cdot \varepsilon_y^2 + 7,3915 \cdot \varepsilon_y - 1,0986$;

$C_d'' = 72,358 \cdot \varepsilon_y^3 + 20,591 \cdot \varepsilon_y^2 - 38,95 \cdot \varepsilon_y + 5,667$;

$D_d'' = -108,82 \cdot \varepsilon_y^3 - 40,947 \cdot \varepsilon_y^2 + 68,253 \cdot \varepsilon_y - 8,6315$.

Тогда для половины профиля заготовки запишем:

$$V_{бок} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{L_0(1 - \delta)}{2} (0,1852 D_{max} + 0,8148 D_{min}) (D_{max} - D_{min}) . \quad (12)$$

После преобразований выражение (12) для целой заготовки принимает вид:

$$V_{бок} = V_{заг} (1 - \delta) (0,1858 k_2^2 - 0,8148 k_1^2 + 0,6296 k_1 k_2) , \quad (13)$$

где $k_2 = D_{max} / D_0$ – относительный максимальный диаметр, вычисляемый как:

$$k_2 = \frac{D_{max}}{D_0} = A_d \cdot m_0^3 + B_d \cdot m_0^2 + C_d \cdot m_0 + D_d , \quad (14)$$

здесь $A_d = 0,7794 \cdot \varepsilon_y^3 - 0,6661 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,0898 \cdot \varepsilon_y - 0,0034$;

$B_d = -11,432 \cdot \varepsilon_y^3 + 9,858 \cdot \varepsilon_y^2 - 1,526 \cdot \varepsilon_y + 0,0752$;

$C_d = 57,264 \cdot \varepsilon_y^3 - 50,311 \cdot \varepsilon_y^2 + 8,9265 \cdot \varepsilon_y - 0,514$;

$D_d = -97,215 \cdot \varepsilon_y^3 + 87,446 \cdot \varepsilon_y^2 - 16,713 \cdot \varepsilon_y + 2,0905$.

Выражения (10) и (13) можно считать равноправными. Объем V_1 трубчатой области, ограниченной сверху контуром бокового профиля с размером D_{min} , а снизу – контуром начальной заготовки с размером D_0 (см. рис. 2), находили как:

$$V_1 = \frac{\pi D_{min}^2}{4} L_k - \frac{\pi D_0^2}{4} L_k, \quad (15)$$

т. е., используя коэффициенты k_1 , k_2 и с учетом выражения (5), получили:

$$V_1 = V_{заг} (1 - \delta) (k_1^2 - 1). \quad (16)$$

Согласно (8), выполняли суммирование выражений (10) и (16):

$$V_{см}'' = V_{заг} [1 - k_1^2 (1 - \delta)] + V_{заг} (1 - \delta) (k_1^2 - 1), \quad (17)$$

Тогда, после преобразований, уравнение (17) принимает вид $V_{см}'' = V_{заг} \cdot \delta$, что соответствует выражению (7), подтверждая правильность расчетов.

Смещенный объем, вычисленный через фигуру профиля заготовки, находили аналогично, просуммировав (13) и (16):

$$V_{см}'' = V_{заг} (1 - \delta) (0,1858k_2^2 - 0,8148k_1^2 + 0,6296k_1k_2) + V_{заг} (1 - \delta) (k_1^2 - 1). \quad (18)$$

Преобразовывая выражение (18) с учетом коэффициента соответствия профиля, который принимает значения $k_{pr} \approx 0,8-0,9$ [8], записывали:

$$\begin{aligned} V_{см}'' &= V_{заг} [(1 - \delta)k_{pr} (0,1858k_2^2 + 0,1852k_1^2 + 0,6296k_2k_1 - 1)] = \\ &= V_{заг} [(1 - \delta)(0,167k_2^2 + 0,166k_1^2 + 0,567k_2k_1 - 1)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Согласно балансу смещенных объемов:

$$V_{см} = V_{см}' = V_{см}'' \quad (20)$$

Соответственно, через смещенные объемы рассчитывали степень деформации ε_{pr} , характеризующую перераспределение металла, при этом можно использовать уравнение (7), тогда:

$$\varepsilon_{pr1} = V_{см} / V_{заг} = \delta, \quad (21)$$

или уравнение (19), тогда:

$$\varepsilon_{pr2} = (1 - \delta) (0,167k_2^2 + 0,166k_1^2 + 0,567k_2k_1 - 1). \quad (22)$$

Для отыскания взаимосвязи степеней деформации ε_{pr1} и ε_{pr2} с величиной ε_y проводили расчеты показателей деформации для заготовок с $m_0 = 4,0; 5,0$ и $6,0$ при наиболее приемлемых значениях $\varepsilon_y = 20-50\%$ (в относительных единицах $\varepsilon_y = 0,2-0,5$). Функциональную зависимость $\delta = f(m_0; \varepsilon_y)$ использовали в виде:

$$\delta \cdot 100\% = A_\delta \cdot m_0^3 + B_\delta \cdot m_0^2 + C_\delta \cdot m_0 + D_\delta, \quad (23)$$

где $A_\delta = -0,0031 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,3105 \cdot \varepsilon_y - 5,2317$; $B_\delta = 0,0454 \cdot \varepsilon_y^2 - 4,4138 \cdot \varepsilon_y + 72,376$;

$C_\delta = -0,212 \cdot \varepsilon_y^2 + 19,908 \cdot \varepsilon_y - 321,28$; $D_\delta = 0,3127 \cdot \varepsilon_y^2 - 27,574 \cdot \varepsilon_y + 455,1$.

Результаты расчетов приведены на рис. 3.

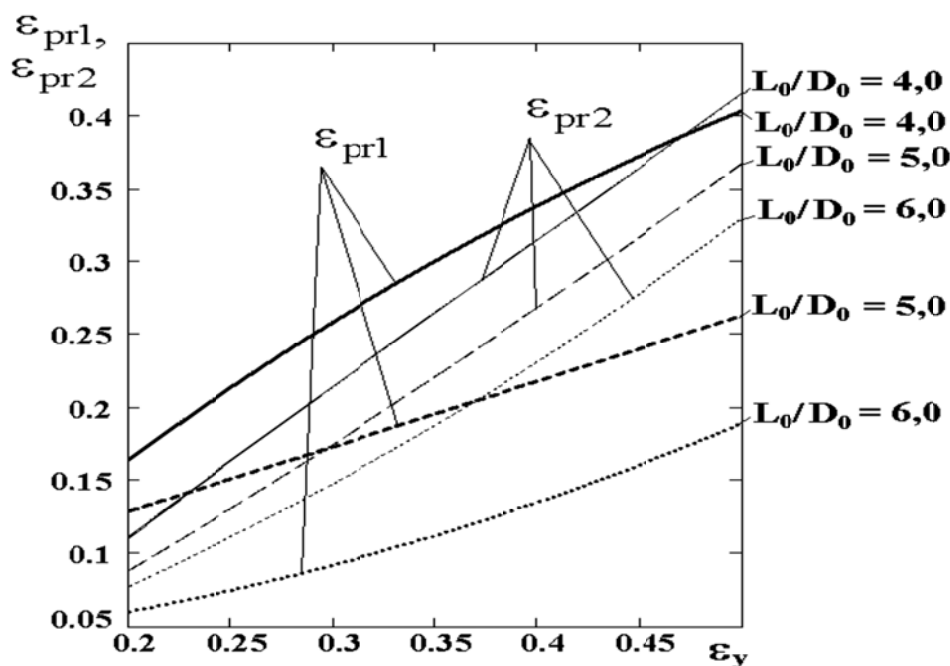


Рис. 3. Зависимость степени деформации, отвечающей за формообразование профиля полуфабриката при продольном изгибе цилиндрической заготовки, от габаритных размеров ($m_0 = L_0 / D_0$) и технологического параметра ε_y

Наибольшее различие между величинами ε_{pr1} и ε_{pr2} , достигающее 41 %, относится к области максимальных обжатий $\varepsilon_y = 50$ % для высоких заготовок с показателем относительной высоты $m_0 = 6,0$ (см. рис. 3). В остальных случаях оба теоретических подхода дают удовлетворительную сходимость результатов.

ВЫВОДЫ

На основе развития метода смещенных объемов (путем рассмотрения баланса объемов исходной и профилированной заготовки) получены расчетные выражения для определения степеней деформации при продольном изгибе заготовки круглого поперечного сечения. Выделены составляющие деформации, характеризующие перераспределение металла в профиль боковой поверхности и изменение геометрических размеров заготовки. Установлена область, в которой два проанализированных теоретических подхода дают различия (до 41 %) при вычислении объема профиля заготовки после продольного изгиба. В перспективе, требуется оценка значений деформаций крайних волокон для сравнения составляющих деформаций изгиба и осадки при профилировании цилиндрических заготовок продольным изгибом и выбора рациональных технологических и термомеханических режимов штамповки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грайфер А. Х. Об устойчивости заготовок при осадке и высадке / А. Х. Грайфер // *Кузнечно-штамповочное производство*, 1970. – № 11. – С. 11–13.
2. Masuda M. Compression Bending / M. Masuda, Y. Tosava // *Bull. Jap. Soc. precision Eng-ng.*, 1963. – № 1. – P. 33–35.
3. Goton Manabu. Elastic-plastic analysis of uni-lateral and bi-lateral compression of severe deformation on the basis of J2F and J2G / Goton Manabu, Shibata Yuji // *Trans. Jap. Soc. Eng. A.*, 1990. – № 56. – P. 529.
4. Огородников В. А. Відновлення деталей машин методом пластичної формозміни / В. А. Огородников, В. Ф. Сердюк // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 1996. – № 3. – С. 58–62.
5. Хван Д. В. Осадка длинномерных заготовок как нетрадиционный способ обработки металлов давлением. / Д. В. Хван, А. А. Воропаев // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький, 2002. – С. 143–147.
6. Зиновьев И. С. Многопереходная высадка в конических пуансонах при штамповке на горизонтально-ковочных машинах. / И. С. Зиновьев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1985. – № 4. – С. 8–11.

7. А.с. 1612433 А1 СССР, МКИ В 21 К 1/08. Способ изготовления деталей типа поворотного кулака. / К. К. Диамантопуло, Ю. А. Смолиенко, О. Ю. Кумунджиева (СССР). – № 4449233/31-27; заявл. 23.05.88; опубл. 16.06.91. – 2 с.ил.

8. Кухарь В. В. Совершенствование технологии объемной штамповки поковок с изогнутой осью на базе нового способа получения профилированной заготовки : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Владимир Валентинович Кухарь – Краматорск, 2003. – 341 с.

9. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров : монография / И. К. Огинский, В. Н. Данченко, А. А. Самсоненко, В. В. Бояркин. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 335 с.

10. Формообразование деталей методом пластического изгиба / А. Я. Мовшович, Н. К. Резниченко, М. М. Буденный, Ю. А. Kochergin // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45. – С. 164–167.

11. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки : монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь : изд-во ЗАО «Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.

REFERENCES

1. Grajfer A. H. Ob ustojchivosti zagotovok pri osadke i vysadke / A. H. Grajfer // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo, 1970. – № 11. – S. 11–13.

2. Masuda M. Compression Bending / M. Masuda, Y. Tosava // Bull. Jap. Soc. precision Engng., 1963. – № 1. – P. 33–35

3. Goton Manabu. Elastic-plastic analysis of uni-lateral and bi-lateral compression of severe deformation on the basis of J2F and J2G / Goton Manabu, Shibata Yuji // Trans. Jap. Soc. Eng. A., 1990. – № 56. – P. 529.

4. Ogorodnikov V. A. Vidnovlennja detalej mashin metodom plastichnoї formozmini / V. A. Ogorodnikov, V. F. Serdjuk // Visnik Vinnic'kogo politehničnogo institutu, 1996. – № 3. – S. 58–62.

5. Hvan D. V. Osadka dlinnomernyh zagotovok kak netradicionnyj sposob obrabotki metallov dav-leniem. / D. V. Hvan, A. A. Voropaev // Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni : zb. nauk. pr. – Kramators'k-Hmel'nic'kij, 2002. – S. 143–147.

6. Zinov'ev I. S. Mnogoperehodnaja vysadka v konicheskij puansonah pri shtampovke na gorizonta'lnokovochnyh mashinah. / I. S. Zinov'ev // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1985. – № 4. – S. 8–11.

7. А.с. 1612433 А1 СССР, МКИ В 21 К 1/08. Способ изготовления деталей типа поворотного кулака. / К. К. Диамантопуло, Ю. А. Смолиенко, О. Ю. Кумунджиева (СССР). – № 4449233/31-27; заявл. 23.05.88; опубл. 16.06.91. – 2 с.ил.

8. Kuhar' V. V. Sovershenstvovanie tehnologii ob#emnoj shtampovki pokovok s izognutoj os'ju na baze novogo sposoba poluchenija profilirovannoj zagotovki : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.03.05 / Vladimir Valentinovich Kuhar' – Kramatorsk, 2003. – 341 s.

9. Processy deformacii metalla na osnove mnogovalkovykh kalibrov : monografija / I. K. Oginskij, V. N. Danchenko, A. A. Samsonenko, V. V. Bojarkin. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2011. – 335 s.

10. Formoobrazovanie detalej metodom plasticheskogo izgiba / A. Ja. Movshovich, N. K. Reznichenko, M. M. Budennyj, Ju. A. Kochergin // Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPІ». – Harkiv : NTU «HPІ», 2011. – № 45. – S. 164–167.

11. Analiz plasticheskogo formoizmenenija v chastnyh zadachah kovki i shtampovki : monografija / V. A. Grinkevich, V. V. Kuhar', M. V. Kraev, V. A. Burko. – Mariupol' : izd-vo ZAO «Gazeta «Priazovskij rabochij», 2011. – 336 s.

Кухарь В. В.

– д-р техн. наук, проф. ПГТУ

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru