

УДК 621.73

**В. В. КУХАРЬ**, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь**РАБОТА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ И ЕЁ ВЗАИМОСВЯЗЬ  
С МАКРОПОКАЗАТЕЛЯМИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ**

Исследовано влияние свойств различных материалов при разных температурах на изменение удельной работы деформации при осадке заготовок плоскопараллельными плитами. Предложена методика учета фактора контактного трения при расчете работы деформации. На основе сведений о закономерностях бочкообразования предложены макропоказатели для оценки формоизменения при осадке и установлена их функциональная связь с удельной работой деформации.

**Ключевые слова:** Осадка, плоскопараллельные плиты, заготовка, работа деформации, макропоказатели формоизменения, функциональная связь.

**Введение.** Осадка является наиболее распространенной подготовительной операцией в технологиях объемной штамповки иковки. Фундаментальные исследования осадки заготовок плоскими плитами были направлены на изучение энергосиловых параметров [1] и формоизменение [2, 3], причем последнее принято оценивать коэффициентом объемной бочкообразности  $\lambda$ , который вычисляют как отношение объема бочкообразной части заготовки  $V_b$  к объему осаживаемой заготовки  $V$ , выраженное в процентах. Объем  $V_b$  заключен между образующей боковой поверхности осаженой заготовки с конечной высотой  $H_k$  и границами условного цилиндра с диаметром, равным диаметру торца  $D_m$ , т.е.  $V_b = V - H_k(\pi D_m^2 / 4)$ .

Согласно современным представлениям [4], на величину бочкообразности, кроме степени деформации  $\varepsilon$  при осадке, соотношение диаметра  $D_0$  к высоте  $H_0$  заготовки (начального коэффициента контакта  $D_0/H_0$ ) и результирующего коэффициента контактного трения  $\mu$ , значительное влияние оказывают свойства материала заготовки. Свойства материалов зависят от вида кривой упрочнения при заданных условиях деформирования, оказывают влияние на энергосиловые параметры и, как следствие, на полную ( $A$ ) и удельную ( $A_y$ ) работу деформации, которые вычисляют соответственно как [1, 2]

$$A = p_{cp} \cdot V \cdot \varepsilon \quad \text{и} \quad A_y = p_{cp} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

где  $p_{cp}$  – среднее давление на контакте за путь деформирования от 0 до  $\varepsilon$ .

В работе [5] теоретически обоснованы способы управления формообразованием заготовок при осадке за счет локального изменения свойств материалов на заданных участках. На основе экспериментально-аналитических подходов установлены количественные различия и математически описаны закономерности изменения бочкообразности при осадке заготовок из черных и цветных металлов и сплавов [6].

Таким образом, учет свойств материалов является необходимым при оценке формоизменения заготовок, которое проводят по конечным размерам и работе деформации, затрачиваемой на их достижение. Характер функциональных связей между удельной работой деформации и различными геометрическими показателями формоизменения заготовок из разных материалов не установлен и подлежит определению.

**Целью исследований** является оценка работы деформации при осадке плоскими плитами заготовок из различных материалов с учетом изменения их свойств в процессе деформирования и установление её функциональной связи с показателями формоизменения.

Бочкообразность при осадке принято связывать с действием сил трения на контакте заготовки с поверхностью осадочных плит. При гипотетическом отсутствии контактного трения ( $\mu = 0$ ) будет наблюдаться осадка с переходом первоначальной цилиндрической за-

готовки также в цилиндрическую, но большего диаметра ( $D_{уд}$ ) и меньшей высоты ( $H_k$ ). Равномерная деформация предполагает равномерное распределение напряжений по объему. Однако в реальных процессах осадки с наличием контактного трения реализуется неравномерное напряженно-деформированное состояние, причем картины полей напряжений зависят от значения  $\mu$ . Неодинаковое упрочнение (а в некоторых случаях – разупрочнение) материала в разных точках объема деформируемого тела приводит к различной его податливости и, как следствие, различию конечных форм осажённых заготовок.

Величина  $\mu$  зависит от многих факторов, учесть и разграничить влияние которых сложно. Это скорость деформирования, температурные условия, наличие смазки на заготовке и инструменте, степень деформации химический состав материала заготовки и инструмента, давление на контакте и др. При прочих равных значениях влияющих факторов, холодная осадка заготовок из разнообразных материалов сопровождается реализацией различных пар трения «инструмент – заготовка» (например, «сталь – сталь», «сталь – медь», «сталь – алюминий» и т.п.), а, следовательно, и различных коэффициентов контактного трения. Учетом подстуживания торцов при горячей деформации с некоторой погрешностью пренебрегают [2]. Для определения значения коэффициента трения при осадке, являющегося результирующим при действии всех влияющих факторов при заданных условиях деформирования, целесообразно использование метода бочкообразования (по С. И. Губкину), приведенного, например, в источнике [2]. Согласно данному методу  $\mu$  вычисляют по показателю конечного формоизменения:

$$\mu = \frac{6,25(\theta_6 - 2\theta_6^2)}{1 + \varepsilon} \left( \frac{D_0}{H_0} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon = (H_0 - H_k)/H_0$  – степень деформации при осадке;

$\theta_6 = (D_6 - D_m)/D_6$  – относительная величина бочкообразования, здесь  $D_6$  и  $D_m$  – диаметры бочки и торца осажённой цилиндрической заготовки.

Показатель  $\theta_6$  определяют по линейным размерам, поэтому будем называть его коэффициентом линейной бочкообразности. Аналитическая зависимость между  $\lambda$  (в %) и  $\theta_6$  (в отн. ед.) определяется как

$$\theta_6 = 1 - \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{0,01\lambda}{1 - 0,01\lambda}} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Значение коэффициента объемной бочкообразности  $\lambda$  для горячей осадки стали Я. М. Охрименко, с некоторым допущением, рекомендует прогнозировать по графикам [2, 3], полученным в результате исследований формоизменения на физических моделях из свинца. Известен вариант аппроксимации данных графиков выражением [3]:

$$\lambda = \frac{5a \left( 15 - \frac{D_0}{H_0} \right) \left[ \left( 1 - 0,1 \frac{D_0}{H_0} \right) + 0,06 \frac{D_0}{H_0} a \right]_{\leq 0,15}}{(a + 1)^2 \sqrt{D_0 / H_0}}; \quad a = \frac{D_{уд}}{H_k} - \frac{D_0}{H_0}. \quad (4)$$

где  $D_{уд}/H_k$  – текущий коэффициент контакта, выражающий степень деформации при осадке, т.к.  $D_{уд} = D_0 \sqrt{1/(1 - \varepsilon)}$  и  $H_k = H_0 (1 - \varepsilon)$ .

Зависимость (4) не учитывает материал и реальные условия деформирования заготовок. Новый подход, предложенный автором, заключается в аппроксимации кривых

$\lambda(D_{уд}/H_{к})$ , полученных для необходимых условий осадки, экспоненциальной зависимостью вида [6]:

$$\lambda = a_0 \cdot (a)^{a_1} \cdot e^{-a_2 \cdot (a)}, \quad (5)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты, определенные для заданных условий деформирования.

Например, для Ст.3 при температуре  $t = 1100$  °С данные коэффициенты вычисляются как [6]

$$a_0 = -23,708 \cdot (D_0 / H_0) + 58,235, \quad (6)$$

$$a_1 = -0,507 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 1,098 \cdot (D_0 / H_0) + 0,244, \quad (7)$$

$$a_2 = -0,18 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,375 \cdot (D_0 / H_0) + 0,328. \quad (8)$$

В дальнейшем используем предварительно полученные значения  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  (приведены в работе [6]) для осадки заготовок из свинца (марка ССу,  $t = 18$  °С), меди (М1,  $t = 850$  °С) и алюминия (АД1,  $t = 18$  °С), проведенной на кривошипном прессе К116Г (0,63 МН).

По мнению, высказанному в источнике [3], показатели формоизменения, вычисляемые как квадрат отношения линейных размеров, имеют функциональную связь с работой деформации. В частности это относится к коэффициенту подкатки  $K_{но}$ , рассчитываемому для заготовительных профилирующих операций. Тогда, применительно к процессу осадки заготовки с бочкообразованием, кроме критериев  $\lambda$  и  $\theta_{\delta}$  (или  $\theta_{\delta}^2$ ), целесообразно определение макропоказателей:

$$K_{no} = (D_{\delta} / D_{уд})^2 \quad \text{и} \quad K_b = (D_{\delta} / D_m)^2. \quad (9)$$

Точное прогнозирование конечных размеров и формы осаженого полуфабриката, позволяет уточнить размеры гравюр штампа на последующих переходах и снизить материалоемкость поковок. После нахождения величин  $\lambda$  определяют размеры осаженой заготовки [3]:

$$D_{\delta} = D_m + 2C, \quad (10)$$

$$\text{где } D_m = D_{уд} \sqrt{1 - 0,01\lambda} \quad \text{и} \quad C = \frac{3}{4} D_m \left( \sqrt{1 + 0,01\lambda / (1 - 0,01\lambda)} - 1 \right).$$

На основании изложенной методики были найдены зависимости макропоказателей формоизменения заготовок при осадке от степени деформации, которые приведены на рис. 1 – рис. 4.

С точки зрения полной и сравнительной оценки энергоемкости формоизменяющей операции необходимо найти зависимости  $\lambda(A_y)$ ,  $\theta_{\delta}^2(A_y)$ ,  $K_{но}(A_y)$  и  $K_b(A_y)$ . При этом для вычисления удельной работы деформации по формуле (1) определяли среднее давление за путь деформирования как

$$p_{cp} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \int_0^{\varepsilon} p(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (11)$$

где  $p(\varepsilon)$  – функция изменения давления по ходу осадки.

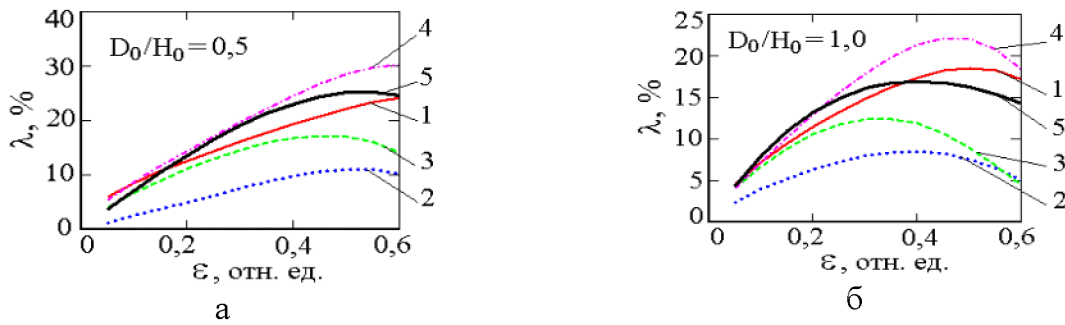


Рис. 1 -- Зависимость  $\lambda(\epsilon)$ : а – при  $D_0/H_0 = 0,5$ ; б –  $D_0/H_0 = 1,0$ ; 1 – М1, 850 °С; 2 – АД1, 18 °С; 3 – ССу, 18 °С; 4 – Ст.3, 1100 °С; 5 – по данным Я.М. Охрименко (свинец – сталь)

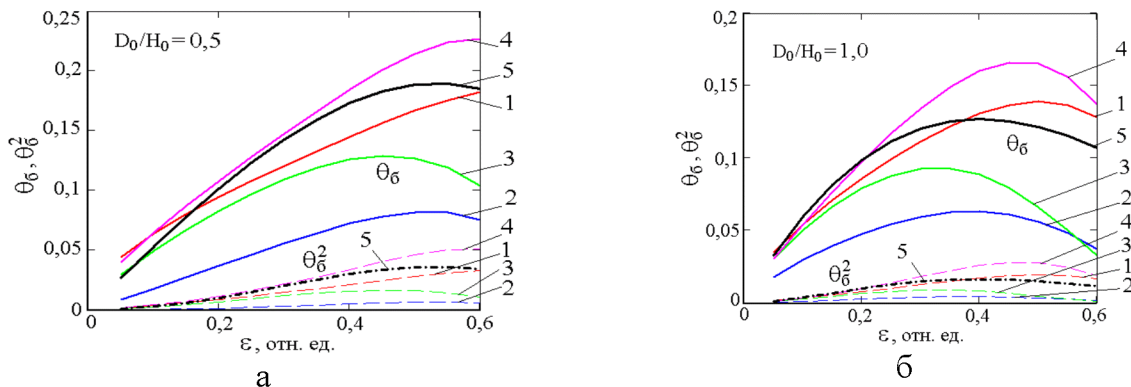


Рис. 2 – Зависимости  $\theta_6(\epsilon)$  и  $\theta_6^2(\epsilon)$ : а – при  $D_0/H_0 = 0,5$ ; б –  $D_0/H_0 = 1,0$ ; 1 – М1, 850 °С; 2 – АД1, 18 °С; 3 – ССу, 18 °С; 4 – Ст.3, 1100 °С; 5 – по данным Я.М. Охрименко (свинец – сталь)

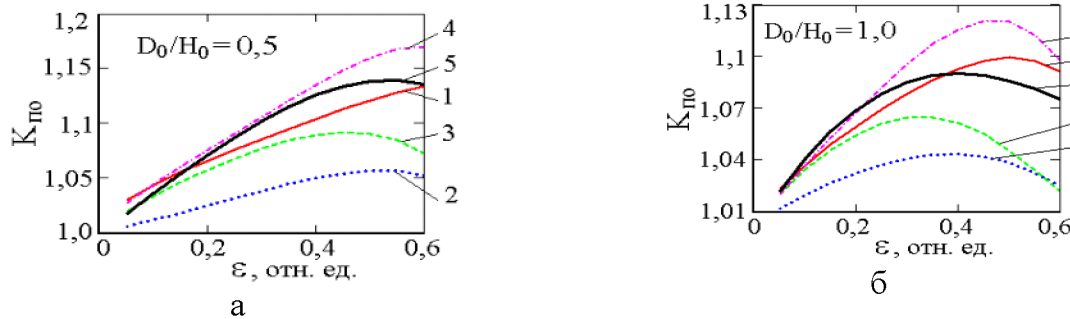


Рис. 3 – Зависимость  $K_{no}(\epsilon)$ : а – при  $D_0/H_0 = 0,5$ ; б –  $D_0/H_0 = 1,0$ ; 1 – М1, 850 °С; 2 – АД1, 18 °С; 3 – ССу, 18 °С; 4 – Ст.3, 1100 °С; 5 – по данным Я.М. Охрименко (свинец – сталь)

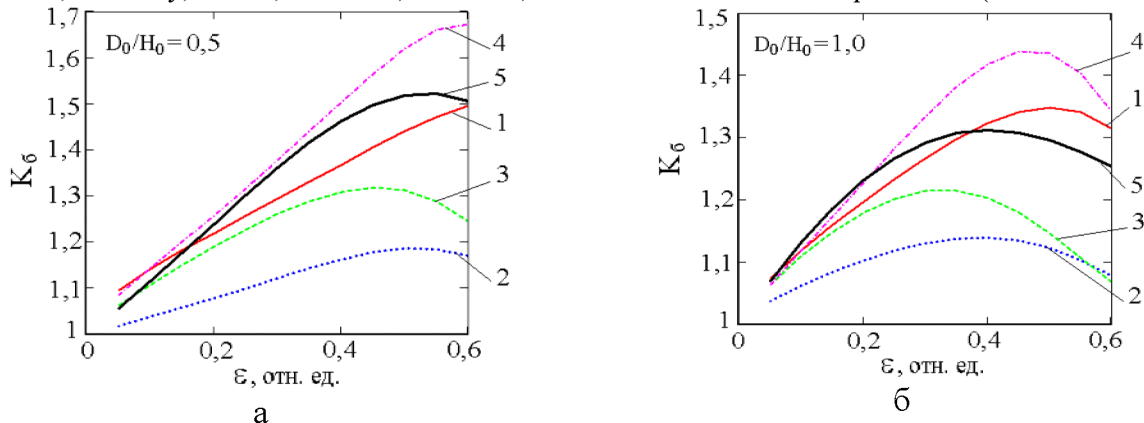


Рис. 4 – Зависимость  $K_6(\epsilon)$ : а – при  $D_0/H_0 = 0,5$ ; б –  $D_0/H_0 = 1,0$ ; 1 – М1, 850 °С; 2 – АД1, 18 °С; 3 – ССу, 18 °С; 4 – Ст.3, 1100 °С; 5 – по данным Я.М. Охрименко (свинец – сталь)

Зависимость  $p(\varepsilon)$ , включающая влияние коэффициента контактного трения, который является переменным по ходу осадки и определяется по выражению (2) с учетом (3), (4) и (5), имеет вид [1]:

$$p = \sigma_s \left( 1 + \frac{\mu}{4} \cdot \frac{D_{u\partial}}{H_k} \right). \quad (12)$$

Функции  $\sigma(\varepsilon)$  при заданной скорости деформации ( $\xi = 10 \text{ с}^{-1}$ ) получали путем обработки данных испытаний или справочника [7] для меди М1 ( $t = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ), алюминия АД1 ( $t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), свинца марки ССу ( $t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и стали Ст.3 ( $t = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) соответственно:

$$\sigma_{s(\text{M1}_{850})} = 4987,9 \cdot \varepsilon^5 - 10887 \cdot \varepsilon^4 + 8942,4 \cdot \varepsilon^3 - 3399,8 \cdot \varepsilon^2 + 587,75 \cdot \varepsilon + 27,866; \quad (13)$$

$$\sigma_{s(\text{AD1}_{18})} = -25,58 \cdot \varepsilon^2 + 63,95 \cdot \varepsilon + 103,63; \quad (14)$$

$$\sigma_{s(\text{CCy})} = -1987 \cdot \varepsilon^4 + 2664,6 \cdot \varepsilon^3 - 1354,4 \cdot \varepsilon^2 + 303,5 \cdot \varepsilon - 0,0108; \quad (15)$$

$$\sigma_{s(\text{St3}_{1100})} = 283,92 \cdot \varepsilon^3 - 429,72 \cdot \varepsilon^2 + 203,52 \cdot \varepsilon + 24,08. \quad (16)$$

Рассчитывали удельные работы деформации при осадке с учетом функций  $\mu(\varepsilon)$ . Графики  $A_y(\varepsilon)$  приведены на рис. 5.

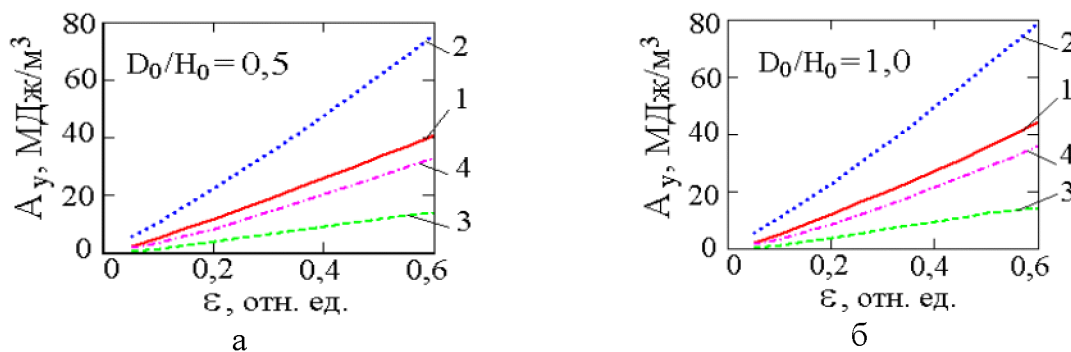


Рис. 5 – Зависимость  $A_y(\varepsilon)$ : а – при  $D_0/H_0 = 0,5$ ; б –  $D_0/H_0 = 1,0$ :  
1 – М1, 850 °С; 2 – АД1, 18 °С; 3 – ССу, 18 °С; 4 – Ст.3, 1100 °С

Определенным значениям макропоказателей формоизменения при осадке соответствуют конкретные величины удельной работы деформации. Следовательно, искомые зависимости  $\lambda(A_y)$ ,  $\theta_0^2(A_y)$ ,  $K_{no}(A_y)$  и  $K_b(A_y)$  можем представить графически (рис. 6). При этом расчет  $\lambda$  по зависимости (4), полученной для свинца как для моделируемой стали, и связанные с ним расчеты других макропоказателей, для выполнения сравнительной оценки отнесены к удельной работе деформации свинца ССу и стали Ст.3 (при 1100 °С) соответственно. Максимальные значения макропоказателей наблюдаются при горячей деформации стальных (Ст.3) заготовок (это частично может быть связано с эффектом подстуживания торцов), а минимальные – при холодной деформации алюминиевых (АД1) заготовок (см. рис. 1 – рис. 6). Использование для расчетов данных Я.М. Охрименко приводит к завышенным значениям макропоказателей по сравнению с регистрируемыми при осадке алюминиевых (АД1, 18 °С) и свинцовых (ССу, 18 °С) заготовок, а также заготовок из меди (М1, 850 °С) в диапазоне  $\varepsilon = 0,18 \dots 0,6$  при  $D_0/H_0 = 0,5$  и  $\varepsilon < 0,39$  при  $D_0/H_0 = 1,0$ , и заниженным значениям по сравнению с наблюдаемыми при осадке стальных (Ст.3) заготовок с  $D_0/H_0 = 0,5$  на всем пути деформирования и заготовок с  $D_0/H_0 = 1,0$  при  $\varepsilon > 0,2$ .

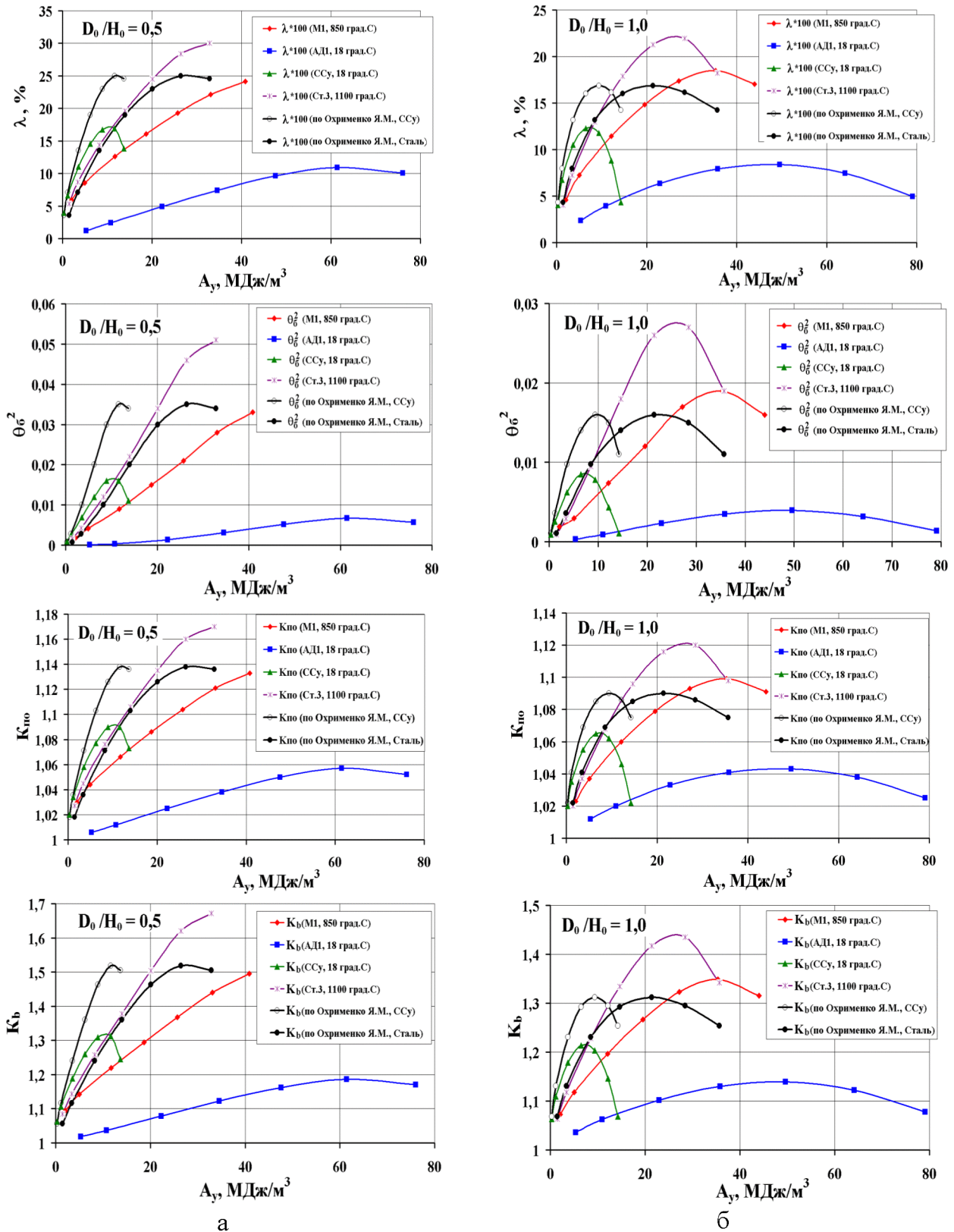


Рис. 6 – Зависимости  $\lambda(A_y)$ ,  $\theta_b^2(A_y)$ ,  $K_{no}(A_y)$  и  $K_b(A_y)$ : а – при  $D_0/H_0 = 0,5$  (а); б –  $D_0/H_0 = 1,0$  для различных материалов и условий осадки

При холодной осадке алюминия, сопровождающейся наибольшими затратами удельной работы деформации, регистрируются минимальные значения макропоказателей формоизменения (рис. 6). При величинах  $A_y < 10 \text{ МДж/м}^3$  макропоказатели формоизмене-

ния осажённых свинцовых образцов являются бóльшими, по сравнению с макропоказателями, реализуемыми при горячей осадке заготовок из стали или меди и при холодной осадке алюминиевых заготовок. Проводя сравнение изучаемых критериев неравномерности деформации при значениях  $A_y = 20 \text{ МДж/м}^3$ , наблюдаем, что наибольшая, средняя и минимальная степень профилирования заготовок отвечают горячей осадке стальных заготовок, медных заготовок и алюминиевых заготовок соответственно (см. рис. 6).

Обработка графических зависимостей рис. 6 методом матричного анализа позволила получить аналитические выражения, характеризующие взаимосвязь макропоказателей формоизменения медных (М1, 850 °С) и стальных (Ст.3, 1100 °С) заготовок соответственно с удельной работой деформации, необходимой для их реализации:

$$\lambda_{(M1\_850)} = a_{LM} \cdot A_y^2 + b_{LM} \cdot A_y + c_{LM}, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{LM} &= 0,0023 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0152 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0008; \\ b_{LM} &= -0,0206 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,287 \cdot (D_0 / H_0) + 0,592; \\ c_{LM} &= 1,1064 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 5,2496 \cdot (D_0 / H_0) + 7,0954; \end{aligned}$$

$$\lambda_{(St3\_1100)} = a_{Lst} \cdot A_y^2 + b_{Lst} \cdot A_y + c_{Lst}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{Lst} &= 0,0301 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0691 \cdot (D_0 / H_0) + 0,008; \\ b_{Lst} &= -1,1037 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 1,9367 \cdot (D_0 / H_0) + 0,7361; \\ c_{Lst} &= 5,816 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 12,26 \cdot (D_0 / H_0) + 8,3328; \end{aligned}$$

$$\theta_{\bar{\sigma}}^2_{(M1\_850)} = a_{qM} \cdot A_y^3 + b_{qM} \cdot A_y^2 + c_{qM} \cdot A_y + d_{qM}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{qM} &= 0,0000009 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,000002 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0000004; \\ b_{qM} &= -0,00006 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,0001 \cdot (D_0 / H_0) - 0,00002; \\ c_{qM} &= 0,0012 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0024 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0014; \\ d_{qM} &= -0,0041 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,007 \cdot (D_0 / H_0) - 0,0016; \end{aligned}$$

$$\theta_{\bar{\sigma}}^2_{(St3\_1100)} = a_{qst} \cdot A_y^3 + b_{qst} \cdot A_y^2 + c_{qst} \cdot A_y + d_{qst}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{qst} &= 0,000003 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,000005 \cdot (D_0 / H_0) - 0,0000003; \\ b_{qst} &= -0,0001 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,0001 \cdot (D_0 / H_0) + 0,00005; \\ c_{qst} &= 0,0005 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0007 \cdot (D_0 / H_0) + 0,001; \\ d_{qst} &= 0,0019 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,005 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0026; \end{aligned}$$

$$K_{no(M1\_850)} = a_{kM} \cdot A_y^2 + b_{kM} \cdot A_y + c_{kM}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{kM} &= 0,000014 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0001 \cdot (D_0 / H_0) + 0,00003; \\ b_{kM} &= -0,0002 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,0017 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0032; \\ c_{kM} &= 0,0074 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0305 \cdot (D_0 / H_0) + 1,0368; \end{aligned}$$

$$K_{no(St3\_1100)} = a_{kst} \cdot A_y^2 + b_{kst} \cdot A_y + c_{kst}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{kst} &= 0,0003 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0007 \cdot (D_0 / H_0) + 0,00022; \\ b_{kst} &= -0,0068 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,012 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0034; \\ c_{kst} &= 0,0347 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0721 \cdot (D_0 / H_0) + 1,0448; \end{aligned}$$

$$K_{b(M1\_850)} = a_{bM} \cdot A_y^2 + b_{bM} \cdot A_y + c_{bM}, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_{bM} &= 0,00006 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0003 \cdot (D_0 / H_0) + 0,00007; \\ b_{bM} &= -0,0022 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,0098 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0092; \\ c_{bM} &= 0,0277 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,1111 \cdot (D_0 / H_0) + 1,1199; \end{aligned}$$

$$K_{b(St3\_1100)} = a_{bst} \cdot A_y^2 + b_{bst} \cdot A_y + c_{bst}, \quad (24)$$

где  $a_{bst} = 0,0007 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,0017 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0004$ ;

$b_{bst} = -0,0277 \cdot (D_0 / H_0)^2 + 0,0494 \cdot (D_0 / H_0) + 0,0106$ ;

$c_{bst} = 0,1273 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 0,26 \cdot (D_0 / H_0) + 1,1427$ .

Коэффициенты детерминации для выражений (17)–(24) имеют значения  $R^2 > 0,98$ . Таким образом, зависимость относительных критериев формоизменения от удельной работы деформации при осадке плоскими плитами может быть достаточно точно описана полиномиальными функциями с наличием экстремумов. Для макропоказателей ( $\lambda$ ), вычисляемых через соотношения объемов, также как и для макропоказателей ( $K_{no}$  и  $K_b$ ), находимых как квадрат соотношения линейных размеров или площади, данные функции являются полиномами второго порядка; для макропоказателей ( $\theta_o^2$ ), вычисляемых как квадрат отношения разности линейных размеров к максимальному диаметру, данные функции являются полиномами третьего порядка.

**Выводы.** На основе уточненных данных для расчета бочкообразности при осадке цилиндрических заготовок из различных материалов плоскими плитами предложены относительные макропоказатели, характеризующие степень профилирования осаженного полуфабриката перед последующими формоизменяющими операциями. Усовершенствован принцип учета свойств материала и коэффициента трения, определяемого по критериям конечного формоизменения, при расчете работы деформации при осадке. Выполнено исследование зависимостей данных макропоказателей от первоначального коэффициента контакта, степени деформации при осадке и определено, что их функциональная взаимосвязь с удельной работой деформации может быть описана полиномами второй и третьей степени с наличием экстремумов.

**Список литературы:** 1. *Сторожев М. В.* Теория обработки металлов давлением / *М. В. Сторожев, Е. А. Попов.* – М.: Машгиз, 1957. – 323 с. 2. *Охрименко Я. М.* Теория процессовковки / *Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин.* – М.: Высш. шк., 1977. – 295 с. 3. *Охрименко Я. М.* Технология кузнечно-штамповочного производства / *Я. М. Охрименко.* – М.: Машиностроение, 1966. – 599 с. 4. *Shlomchack G. G.* Rheological complexity of metals and anomalies of their deformation / *G. G. Shlomchack, A. M. Melnik, I. Mamuzič* // *Metallurgija.* – Zagreb, 1996. – Vol. 35, Br. 2. – P. 83–86. 5. *Воронцов А. Л.* Исследование осадки цилиндрической заготовки с затрудненным течением металла на одном из торцов / *А. Л. Воронцов* // *Вестник машиностроения.* – 2009. – № 2. – С. 67–74. 6. *Кухарь В. В.* Бочкообразование при осадке черных и цветных металлов и сплавов / *В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко* // *Труды межд. науч.-техн. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов».* 26–28 сентября 2007 г. – Санкт-Петербург: из-во СПбГПУ, 2007. – С. 347–351. 7. *Полухин П. И.* Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник / *П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин.* – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

Надійшла до редколегії 19.10.2012

УДК 621.73

**Работа деформации при осадке и её взаимосвязь с макропоказателями формоизменения / Кухарь В. В.** // *Вісник НТУ «ХП».* Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 47(953). – С. 53–61. – Бібліогр.: 7 назв.

Досліджено вплив властивостей різних матеріалів при різних температурах на зміну питомої роботи деформації при осаджуванні заготовок плоскими плитами. Запропонована методика врахування фактору контактного тертя при розрахунку роботи деформації. На основі відомостей про закономірність бочкоутворення запропоновані макропоказники для оцінки формозміни при осаджуванні та встановлено їх функціональний зв'язок із питомою роботою деформації.

**Ключові слова:** осаджування, плоскі плити, заготовка, робота деформації, макропоказники формозміни, функціональний зв'язок.



The change of specific work of deformation during upsetting by flat anvil-plates of billets from different materials in different conditions was research. Method of count of contact friction factor during calculation of a work of deformation was proposed. The macro-indexes for estimation of changing of form during upsetting of billets from different materials were proposed on the base empirical data about lows of barreling and their functional connection with specific work of deformation was finding.

**Keywords:** upsetting, flat anvil-plates, billet, work of deformation, macro-indexes of the changing forms, functional connection.

УДК 621.7.044

*Р. В. ЛЕВЧЕНКО*, аспирант, КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг,  
*Е. А. НАУМОВА*, ассистент, КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг,  
*Р. Г. ПУЗЫРЬ*, канд. техн. наук, доц., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБЕЧАЕК

Распределение напряжений и деформаций при локальном деформировании оболочек вращения, что имеет место при производстве ободьев колес из цилиндрических сварных заготовок, существенно отличается от напряженно-деформированного состояния заготовки в традиционных операциях листовой штамповки. Опираясь на теорию упругого деформирования оболочек вращения, можно интенсифицировать операции локального обжима и раздачи, путем усовершенствования используемого оборудования. Показано, что при действии на оболочку сосредоточенной нагрузкой в окружном направлении возникает разноименное напряженное состояние. Только в месте приложения нагрузки тангенциальные напряжения сжимающие, на выходе из очага деформации – они равны нулю, а в ненагруженной части цилиндра – растягивающие. Это необходимо учитывать при проектировании рациональных технологических процессов локального деформирования.

**Ключевые слова:** обжим, раздача, заготовка, локальная деформация.

**Введение.** Производство стальных ободьев колес автомобилей и других транспортных средств, преимущественно, основано на процессах локального деформирования цилиндрической заготовки парой вращающихся роликов и операций листовой штамповки – раздачи и обжима.

**Анализ последних исследований и литературы.** Сущность операций раздачи и обжима хорошо освещена в литературе [1, 2], где определяется напряженно-деформированное состояние полуфабриката в зависимости от условий деформирования и геометрических параметров заготовки и инструмента. При этом в процессе обжима создаются благоприятные условия для перехода металла в пластическое состояние, так как в очаге деформации действуют сжимающие меридиональные и тангенциальные напряжения. Условия перехода заготовки в пластическое состояние определяются по гипотезе максимальных касательных напряжений в виде

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s, \quad (1)$$

т.е., когда величина тангенциального сжимающего напряжения достигнет предела текучести материала [2]. Очаг деформации в процессе обжима (раздачи) представляет собой кольцевой участок определенного диаметра и ширины, причем размеры его постоянно изменяются в зависимости от движения инструмента.

Геометрический очаг деформации при формоизменении цилиндрической заготовки роликом (осадка, раздача) отличается от указанного выше. Он представляет собой пятно контакта между вращающимися деформирующим инструментом и заготовкой в каждый последующий этап деформирования, что обуславливает снижение усилий локального обжима или раздачи в 5-10 раз по сравнению с традиционными методами. Отсюда вытекают особенности напряженно-деформированного состояния при локальном действии сил.

© Р. В. Левченко, Е. А. Наумова, Р. Г. Пузырь, 2012