

УДК 621.73

Кухарь В. В.

ВЛИЯНИЕ РАДИУСНОСТИ ВЫПУКЛЫХ ПРОДОЛГОВАТЫХ ОСАДОЧНЫХ ПЛИТ НА ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПАСА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ КУЗНЕЧНОЙ ОСАДКЕ

В технологических процессахковки и на подготовительных переходах горячей объемной штамповки широко используют операцию осадки, которая может иметь различное назначение: для достижения требуемого укова при производстве поковок ответственного назначения, для сбива окалины, для формирования требуемой микроструктуры и служебных свойств изделия, для приближения формы исходной заготовки (или слитка) к конфигурации поковки. При этом осадку осуществляют инструментом различной конфигурации: вогнутыми или выпуклыми сферическими плитами [1–3], плитами с отверстием [1, 2, 4], коническими плитами [5], выпуклыми продолговатыми плитами [2, 6, 7], совмещают осадку с операциями выдавливания и т.п. В работах [2, 6] отмечено, что проведение осадки слитков выпуклыми продолговатыми плитами перед последующей протяжкой снижает массу концевых обрубков не менее чем на 3 %, а профилирование заготовок таким инструментом перед последующей штамповкой поковок пластин способствует лучшему заполнению гравюр штампов и экономии металла на уровне 7–16 % [7].

Результаты исследований закономерностей формоизменения заготовок при осадке выпуклым продолговатым инструментом приведены, например, в работе [8]. Однако, кроме прогнозирования конечной формы полуфабрикатов, для назначения рациональных режимов деформирования необходимо оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) и степень использования запаса пластичности (СИЗП) заготовок на боковой поверхности, где разрушение материала наиболее вероятно. В работах [9, 10] проведена оценка НДС и СИЗП цилиндрических заготовок (слитков) при осадке коническими и плоскими плитами с различными условиями на контакте, а процессы осадки выпуклыми продолговатыми плитами до настоящего времени исследованы недостаточно.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей изменения НДС и СИЗП в процессах осадки выпуклыми продолговатыми плитами с различным отношением радиуса (R) выпуклости плиты к исходному диаметру (D_0) заготовки.

Деформация заготовок при свободной осадке выпуклыми продолговатыми плитами не сопровождается боковым подпором инструмента, что ухудшает условия их деформирования в первую очередь на образующих поверхностях. Геометрические характеристики, такие как радиусность (R/D_0) выпуклых продолговатых плит, следует учитывать при назначении режимов деформации, которые должны исключать нарушение целостности заготовки.

Изучение НДС и СИЗП проводили на физических моделях с привлечением феноменологической теории деформируемости. Для физического моделирования процессов горячей обработки в качестве материала заготовок принято использовать свинец [11, 12], при этом изменение в свинце концентрации сурьмы позволяет влиять на кривые упрочнения лабораторного материала, делая его пригодным для изучения горячей деформации сталей с различным содержанием легированных элементов в широком диапазоне температур (t).

Применяя методику расчета концентрации сурьмы [12] установили, что модельный материал (свинец сурьмянистый марки ССу) соответствует горячей деформации среднелегированных сталей и обуславливает допущение изотермических условий осадки для обеспечения пластического и геометрического подобия модели (M) и натуры (N): $\varepsilon_M = \varepsilon_N$, $\mu_M = \mu_N$, $(H_0/D_0)_M = (H_0/D_0)_N$, $\xi_M = \xi_N$, $v_M = v_N/n_M$, где ε – степень деформации; μ – коэффициент трения; ξ – скорость деформации; v – скорость деформирования, n_M – масштабный коэффициент.

Образцы с $D_0 = 40$ мм изготавливали прессованием (коэффициент вытяжки 5,06) свинца ССу с дальнейшей отрезкой на требуемую высоту $H_0 = 80$ мм. Отношение $H_0/D_0 = 2,0$

образцов отвечает геометрическому подобию наиболее широко распространенного типа кузнечных слитков и соответствует определенной номенклатуре заготовок, используемых в цехах горячей объемной штамповки.

Исходную информацию для оценки НДС и СИЗП получали, применяя метод делительных сеток. Координатные ячейки с начальными размерами $a_0 = b_0 = 2$ мм наносили спереди и сзади образцов по середине их высоты в трех направлениях: вдоль оси (№ 1), под углом 45° (№ 2) и поперек оси (№ 3) осадочных плит (рис. 1, а). После каждого n -го этапа осадки измеряли конечные размеры ячеек a_n и b_n (рис. 1, б). Принимали допущения об изотропности деформируемого тела, однородности деформации в пределах отдельно взятой ячейки с учетом малости выделенной части по сравнению с размерами всего образца.

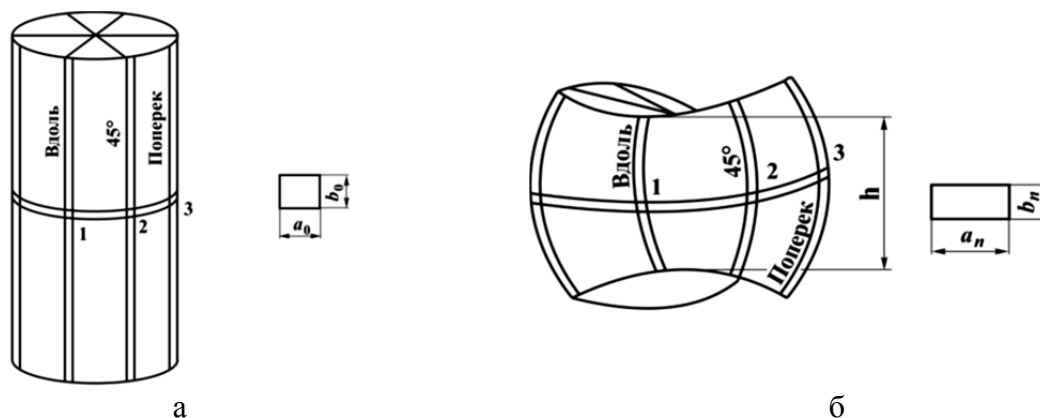


Рис. 1. Разметка при исследовании НДС и СИЗП образцов, осаживаемых выпуклыми продолговатыми плитами (1... n – номера этапов деформирования)

Осадку моделей производили на $\varepsilon' = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ и $0,5$, причем:

$$\varepsilon' = [(H_0 - h) / H_0], \quad (1)$$

где h – минимальная высота осаживаемой заготовки (см. рис. 1б).

В рассматриваемых ячейках главные оси напряжений σ_m и деформаций e_m ($m = 1, 2, 3$) совпадают с осями цилиндрических координат, т.е. $m = \rho, \theta, z$ (монотонный процесс). Логарифмические деформации e_ρ, e_θ и e_z в ячейках определяли из данных эксперимента как:

$$e_\theta = \ln \frac{a}{a_0}; \quad e_z = \ln \frac{b}{b_0} \quad \text{и} \quad e_\rho = -e_z - e_\theta, \quad (2)$$

Интенсивность деформаций сдвига (Γ) на боковой поверхности образца вычисляли как:

$$\Gamma = 2\sqrt{e_\theta^2 + e_\theta e_z + e_z^2}. \quad (3)$$

Компонент девиатора напряжений рассчитывают из выражения [11]:

$$(\sigma_m - \sigma) = \frac{2\Gamma}{\Gamma} \cdot e_m, \quad (4)$$

где T – интенсивность касательных напряжений.

Учитывая условие, что на свободной поверхности $\sigma_\rho = 0$, можно записать:

$$\frac{\sigma_z - \sigma}{2T} = \frac{e_z}{\Gamma}; \quad \frac{\sigma_\theta - \sigma}{2T} = \frac{e_\theta}{\Gamma}; \quad -\frac{\sigma}{2T} = \frac{e_\rho}{\Gamma}. \quad (5)$$

В формуле (4) для вычисления компоненты девиатора напряжений гидростатическое напряжение определяют как $\sigma = (\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z) / 3$. Тогда уравнения для расчета напряжений:

$$\sigma = -\frac{2T}{\Gamma} e_{\rho}; \quad \sigma_z = \frac{2T}{\Gamma} (e_z - e_{\rho}); \quad \sigma_{\theta} = \frac{2T}{\Gamma} (e_{\theta} - e_{\rho}). \quad (6)$$

Вычисления по (3)–(5) возможны с учетом допущения справедливости гипотезы единой кривой, когда для каждой ячейки $T = \sigma_s / \sqrt{3}$, где $\sigma_s = \sigma_s(e_i; \xi_i; t)$ – сопротивление материала пластической деформации при заданных условиях, определяемое по кривым упрочнения (здесь e_i и ξ_i – интенсивность деформаций и интенсивность скоростей деформаций).

С учетом (6) коэффициент жесткости схемы НДС рассчитывали в виде [9–11]:

$$k_{\varepsilon} = \frac{\sigma}{T} = -\frac{2e_{\rho}}{\Gamma}. \quad (7)$$

СИЗП по В. Л. Колмогорову определяют по критерию [11]:

$$\Psi = \int_0^{\tau_p^*} E(t - \tau) B(\tau) \frac{H(\tau)}{\Lambda_p[k_{\varepsilon}(\tau)]} d\tau < 1, \quad (8)$$

где τ , τ_p^* и H – текущее время осадки, время деформирования, при котором наступает разрушение соответственно и интенсивность скоростей деформаций сдвига;

$E(t - \tau)$ – коэффициент самозалечивания дефектов при высоких температурах;

$B(\tau)$ – величина, учитывающая скорость развития микродефектов и их залечивание.

Как отмечено В. А. Огородниковым [13], практическое использование критерия (8) затруднено из-за отсутствия в литературе данных о значениях $E(t - \tau)$ и $B(\tau)$ при различных процессах пластического деформирования. В работах [11, 13] для процесса, близкого к монотонному, данные коэффициенты рекомендуется принимать равными единице, тогда:

$$\Psi = \int_0^{A_p} \frac{dA}{A_p(k_{\varepsilon})} = 1 \quad \text{или} \quad \Psi = \frac{\Gamma}{A_p(k_{\varepsilon})}. \quad (9)$$

По результатам исследований В. Ф. Зотова [14], предельная степень деформации $A_p(k_{\varepsilon})$ может быть найдена из выражения:

$$\Lambda_p = b_0 + b_1 k_{\varepsilon} + b_2 k_{\varepsilon}^2, \quad (10)$$

где b_0 , b_1 и b_2 – коэффициенты для некоторых материалов и условий деформирования, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значения коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 уравнения (10) для расчета $A_p(k_{\varepsilon})$ [14]

Материал (сталь)	Температура	b_0	b_1	b_2
X12MB	900 °C	3,17	-4,08	1,66
	1140 °C	3,19	-4,56	1,6
P18	1000 °C	2,34	-5,19	4,01
	1200 °C	2,95	-5,92	3,09

Свойства материала слабо влияют на путь деформирования его частиц, поэтому использование для расчета предельных технологических параметров зависимостей $k_{\varepsilon}(T)$, полученных на модельном материале (ССу), является оправданным [13].

Деформирование проводили стальными (5ХНВ) выпуклыми продолговатыми плитами радиусом $R = 30$ мм; 50 мм; 75 мм; 100 мм и ∞ (плоские плиты), т. е. величина радиусности $R/D_0 = 0,75; 1,25; 1,875; 2,5$ и ∞ . Перед осадкой контактные поверхности плит и образцов

одной партии обезжиривали ацетоном, а второй партии – смазывали индустриальным маслом (И20). По результатам измерений размеров ячеек сетки до и после деформирования (см. рис. 1) выполняли расчеты показателей (2), (3), (7), (9) и (10).

Были установлены зависимости $\Gamma(\varepsilon'; R/D_0)$ и $k_\varepsilon(\varepsilon'; R/D_0)$ для ячеек, расположенных в продольном и поперечном направлении при деформировании сухими и смазанными осадочными плитами. В связи с ограничениями объема статьи, на рис. 2 и рис. 3 приведены графики, касающиеся только экспериментов по осадке сухими плитами.

С увеличением ε' наблюдается рост интенсивности деформации Γ как в продольном, так и в поперечном направлении заготовок, при этом использование смазки понижает Γ на 1,5–9,1 %. Уменьшение R/D_0 также приводит к возрастанию Γ вдоль оси осадочных плит, а в поперечном направлении выявлены точки пересечения кривых $\Gamma(\varepsilon')$ для различных R/D_0 (см. рис. 2) в связи с тем, что на начальных стадиях осадки выпуклыми продолговатыми плитами заготовок с $H_0/D_0 = 2,0$ наблюдается двойное бочкообразование, приводящее на начальных ε' к наименьшей интенсивности роста Γ для заготовок с наибольшим R/D_0 . При дальнейшей осадке, когда двойная бочка стремится перейти в одинарную, величина Γ возрастает тем быстрее, чем больше R/D_0 , причем при отсутствии смазки абсцисса области пересечения кривых $\varepsilon' \cong 0,18-0,2$ (см. рис. 2, б), а при наличии смазки она смещается к $\varepsilon' \cong 0,23-0,25$. При осадке до $\varepsilon' > 0,25$ значения Γ для всех отношений R/D_0 являются большими, чем для случая осадки плоскими плитами.

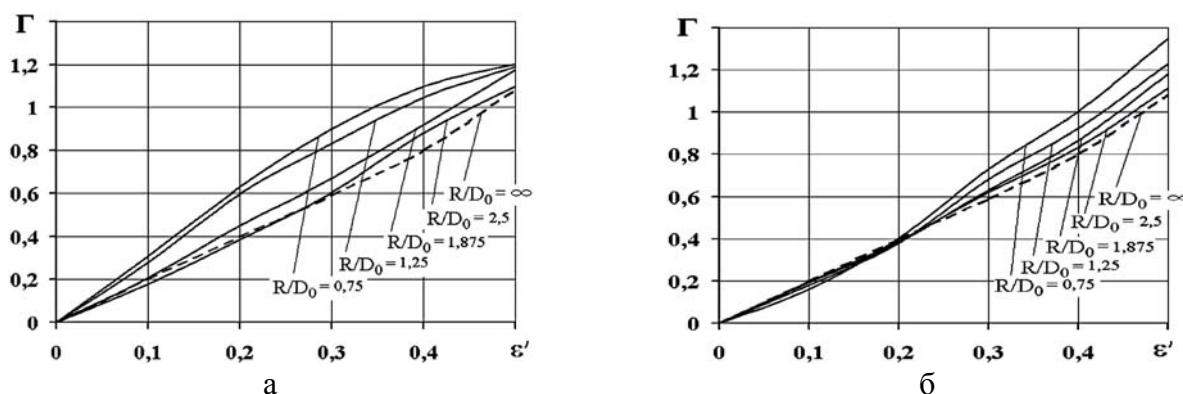


Рис. 2. Зависимость $\Gamma(\varepsilon'; R/D_0)$ при осадке физических моделей сухими выпуклыми продолговатыми осадочными плитами с различной радиусностью R/D_0 :

а – вдоль оси плит; б – поперек оси плит

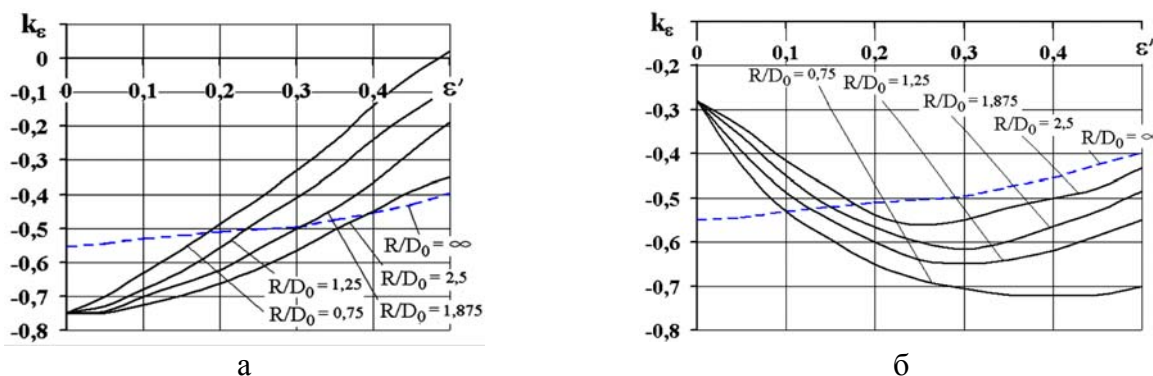


Рис. 3. Зависимость $k_\varepsilon(\varepsilon'; R/D_0)$ при осадке физических моделей сухими выпуклыми продолговатыми осадочными плитами с различной радиусностью R/D_0 :

а – вдоль оси плит; б – поперек оси плит

Величины k_ε находятся в области отрицательных значений, что свидетельствует о преимущественных деформациях сжатия на боковой поверхности заготовок, причем снижение величины R/D_0 приводит к росту k_ε в продольном направлении (см. рис. 3, а). С увеличением ε'

схема НДС на боковой поверхности вдоль оси плит становится более жесткой, причем отсутствие смазки повышает неравномерность деформации, что обуславливает более высокие (на 8–35 %) показатели k_{ε} , по сравнению с осадкой смазанными плитами. В поперечном направлении на начальных стадиях осадки наблюдается снижение k_{ε} , которое сменяется ростом в областях $\varepsilon' > 0,25$, причем при осадке смазанными плитами данный рост начинается позже (см. рис. 3, б). Это также объясняется переходом двойной бочки в одинарную при увеличении ε' , а применение смазки, в общем случае, благоприятно влияет на схему НДС.

Проводили расчет $A_p(k_{\varepsilon})$ для стали X12MB при $t = 1140$ °С и стали P18 при $t = 1200$ °С по выражению (10). Установлено, что с увеличением ε' и со снижением значения R/D_0 величина A_p в продольном направлении заготовки уменьшается, а в поперечном направлении наблюдается вначале рост, а затем снижение A_p по ходу осадки, причем большие значения A_p соответствуют меньшим величинам R/D_0 осадочных плит. Значения A_p при горячей деформации для стали X12MB меньше на 7,2–13 %, чем для стали P18. Применение смазки повышает A_p на 8–14,5 % в продольном направлении заготовки. В поперечном направлении при осадке плитами с $R/D_0 = 2,5$ на протяжении всего рабочего хода, и с $R/D_0 = 0,75$ –1,875 до $\varepsilon' = 0,3$ –0,35 при использовании смазки реализуются более низкие (в среднем на 4–8 %) значения A_p , чем при осадке сухими плитами. Для обжатий $\varepsilon' > 0,35$ при осадке выпуклыми плитами с $R/D_0 = 0,75$ –1,875 в поперечном направлении значения A_p являются более высокими в случае использования смазки.

На рис. 4 приведены построенные пути деформирования в направлении вдоль и поперек оси выпуклых плит и показано, что они не пересекают диаграммы $A_p(k_{\varepsilon})$ для сталей X12MB ($t = 1140$ °С) и P18 ($t = 1200$ °С). Применение смазки оказывает благоприятное влияние на характеристики НДС.

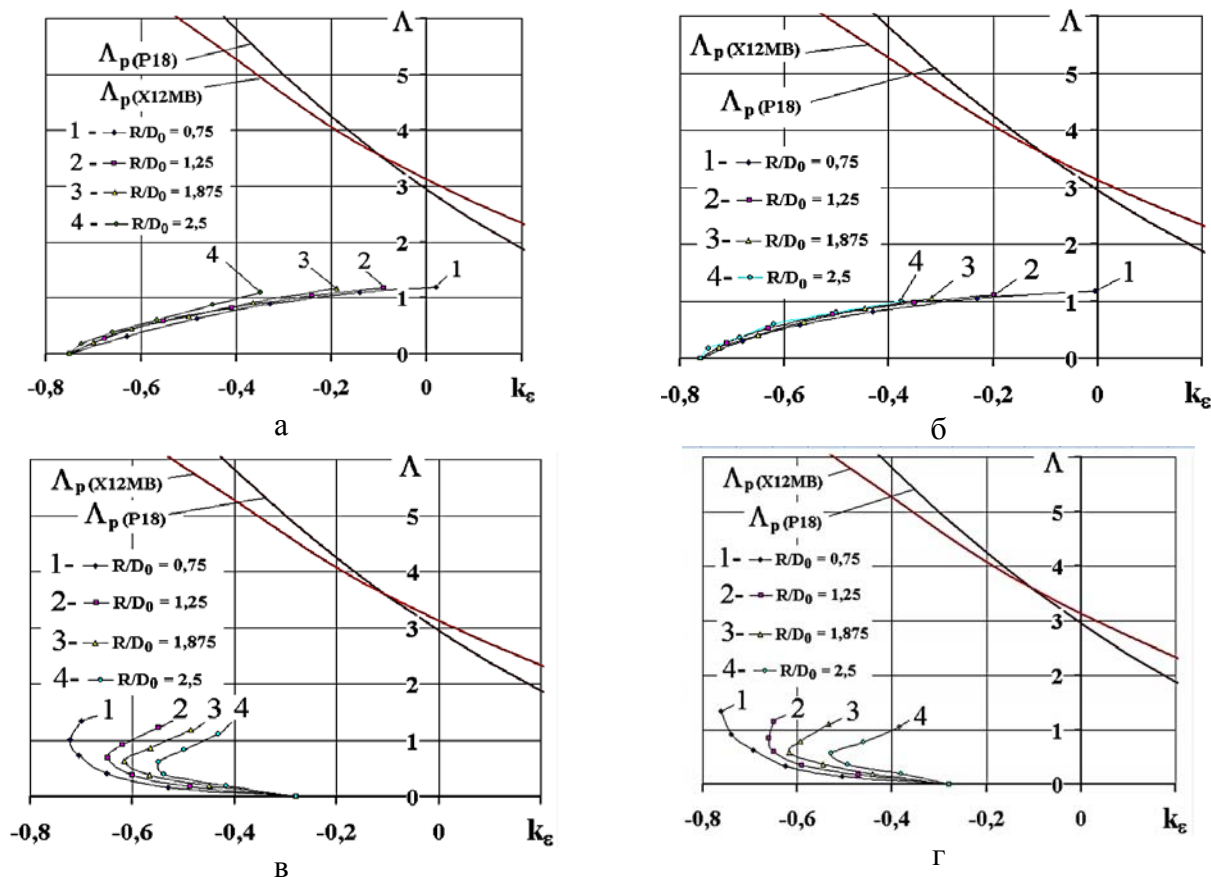


Рис. 4. Пути деформирования при осадке выпуклыми продолговатыми плитами с различным R/D_0 и диаграммы пластичности сталей X12MB при 1140 °С и P18 при 1200 °С:

а – вдоль оси плит, сухие плиты; б – вдоль оси плит, смазанные плиты; в – поперек оси плит, сухие плиты; г – поперек оси плит, смазанные плиты

Вычисление СИЗП подтверждает рост Ψ как в продольном, так и в поперечном направлении с увеличением ε' (рис. 5). Наибольшие значения Ψ реализуются: вдоль оси плит – при малых величинах R/D_0 , а поперек оси плит – при максимальных показателях R/D_0 . Использование смазки снижает СИЗП на 5–15 % (см. рис. 5).

На рис. 6 показано, как радиусностью R/D_0 выпуклых плит (сухих и смазанных) влияет на СИЗП заготовок из сталей X12MB и P18 при горячей осадке на фиксированные степени деформации $\varepsilon' = 0,1$ и $\varepsilon' = 0,5$ в продольном и поперечном направлениях.

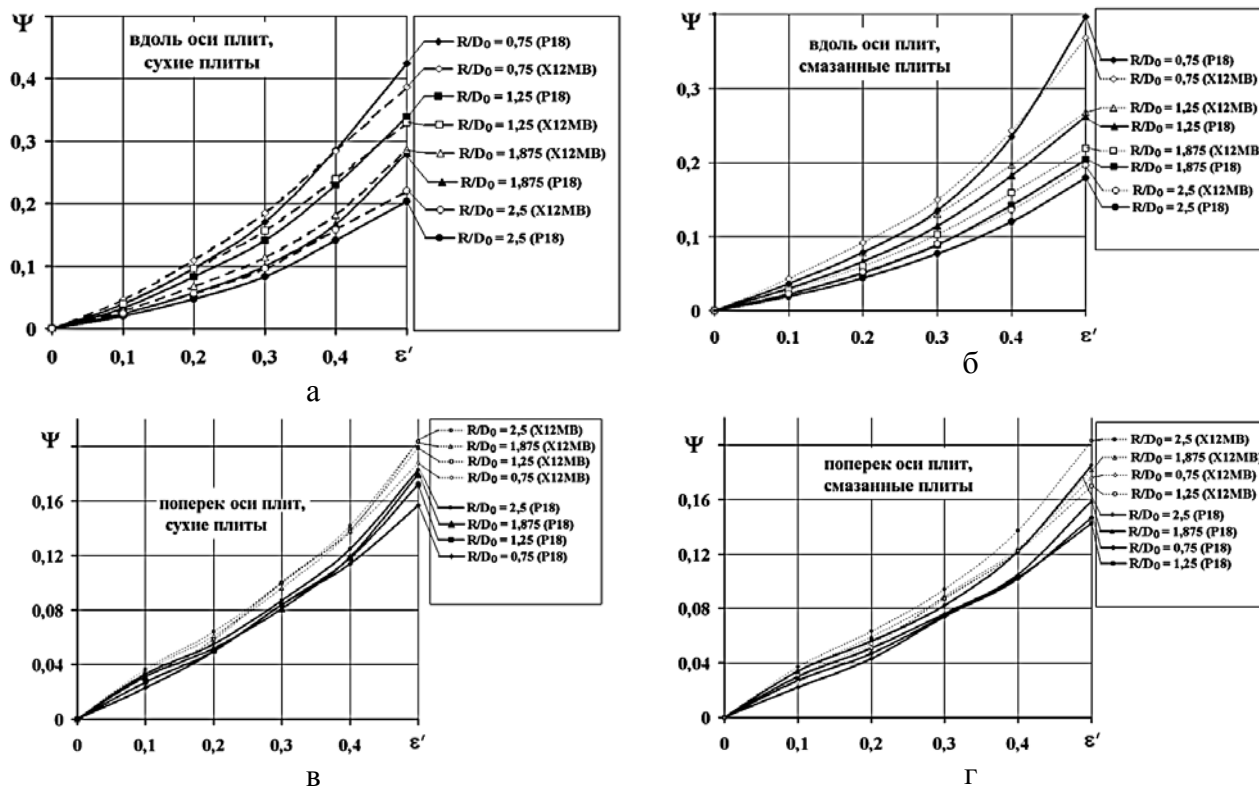


Рис. 5. СИЗП (Ψ) при горячей осадке заготовок (X12MB и P18) выпуклыми продолговатыми плитами при различных R/D_0 :

а – вдоль оси плит, сухие плиты; б – вдоль оси плит, смазанные плиты; в – поперек оси плит, сухие плиты; г – поперек оси плит, смазанные плиты

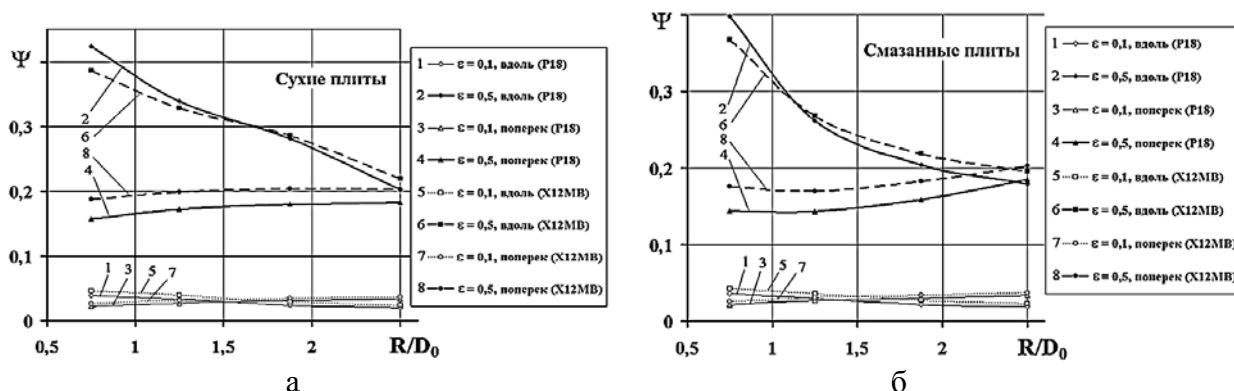


Рис. 6. Зависимость $\Psi(R/D_0)$ при осадке заготовок (X12MB при 1140 °С и P18 при 1200 °С) до $\varepsilon' = 0,1$ и $\varepsilon' = 0,5$ выпуклыми продолговатыми плитами:

а – сухие плиты; б – смазанные плиты

Увеличение R/D_0 приводит к снижению СИЗП заготовок в продольном направлении и слабому росту Ψ в поперечном направлении относительно оси выпуклых продолговатых осадочных плит, причем для стали P18 эти изменения происходят в более широких пределах.

ВЫВОДЫ

На физических моделях из сурьмянистого свинца проведено исследование НДС и СИЗП при кузнечной осадке заготовок (слитков) выпуклыми продолговатыми осадочными плитами с различными показателями радиусности R/D_0 . Экспериментальным путем установлены зависимости $\Gamma(\varepsilon'; R/D_0)$, $k_\varepsilon(\varepsilon'; R/D_0)$, $A_p(k_\varepsilon)$, $k_\varepsilon(\Gamma)$, $\Psi(\varepsilon'; R/D_0)$ при осадке сухими и смазанными выпуклыми осадочными плитами в продольном и поперечном направлении относительно оси плит. Показано, что из-за наличия двойного бочкообразования на начальных стадиях в поперечном направлении на середине высоты заготовок преобладает деформация сжатия, а в продольном направлении наблюдается ужесточение схемы НДС.

Установлено, что пути деформирования на середине высоты заготовки вдоль и поперек оси выпуклых продолговатых осадочных плит являются безопасными, не пересекающимися диаграммы пластичности для горячей осадки сталей X12MB (при 1140 °C) и P18 (при 1200 °C), следовательно, разрушение заготовок является маловероятным. С увеличением степени деформации ε' происходит рост СИЗП, причем для стали X12MB при максимальных ε' данные показатели больше на 12–14 %, что связано с меньшей её пластичностью.

Выявлено, что увеличение радиусности R/D_0 осадочных плит сопровождается снижением показателей СИЗП в продольном направлении и слабым их увеличением в поперечном направлении заготовок при осадке. Применение смазки благоприятно влияет на показатели НДС во всех случаях осадки выпуклыми продолговатыми плитами, в общем случае, снижая показатели СИЗП на 5–15 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарновский И. Я. Свободная ковка на прессах / И. Я. Тарновский, В. Н. Трубин, М. Г. Златкин – М. : Машиностроение, 1967. – 328 с.
2. Ковка слитков на прессах / Л. Н. Соколов [и др.]; под ред. Л. Н. Соколова. – К. : Техніка, 1984. – 127 с.
3. Володин И. М. Сравнительный анализ традиционных и новых технологических процессов изготовления поковок с развитым фланцем / И. М. Володин, С. А. Бирюков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 284–287.
4. Вплив геометричних параметрів заготовки на утворення утяжини при осадці диска на плиті з отвором / І. С. Алієв, О. Є. Марков, С. В. Янчук [та ін.] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 188–191.
5. Влияние операции выворота поковки коническими плитами на распределение деформаций / И. С. Алиев, О. Е. Марков, Я. Г. Жбанков, С. А. Близнюк // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 64–68.
6. Иванушкин П. Ф. Рациональные методы ковки толстых пластин / П. Ф. Иванушкин, Н. Т. Костюченко // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. XVIII. – С. 178–183.
7. Пат. 44484 Україна, МПК(2009) B21K 1/00, B21J 5/00. Спосіб штампування поковок пластин / Кухар В. В., Бурко В. А., Лаврентік О. О., Дубініна А. В. – № 200902832; заявл. 26.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19. – 5 с. :іл.
8. Кухарь В. В. Исследование особенностей формоизменения цилиндрических заготовок при осадке выпуклыми продолговатыми плитами / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 1. – С. 66–68.
9. Кухарь В. В. Оценка напряженно-деформированного состояния и степени использования запаса пластичности при осадке цилиндрических заготовок коническими плитами / В. В. Кухарь // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 3. – С. 96–99.
10. Кухарь В. В. Напряженно-деформированное состояние и степень использования запаса пластичности на боковой поверхности осажённых заготовок при различных условиях на контакте / В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло, В. А. Бурко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 157–162.
11. Колмогоров В. Л. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров [и др.]; под ред. В. Л. Колмогорова. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.
12. Мигачев Б. А. Моделирование технологических процессов ковки / Б. А. Мигачев, В. Л. Колмогоров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 1. – С. 11–13.
13. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
14. Зотов В. Ф. Производство проката / В. Ф. Зотов. – М. : «Интермет Инжиниринг», 2000. – 352 с.

Кухарь В. В. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.02.2012 г.