

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  $\varepsilon$  – степень деформации;  $\mu$  – коэффициент трения;  $\xi$  – 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  $45^\circ$  (№ 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.

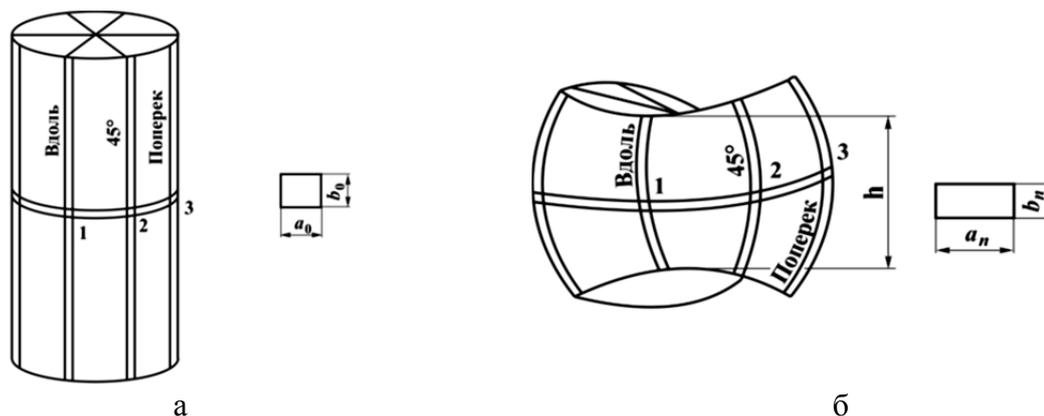


Рис. 1. Разметка при исследовании НДС и СИЗП образцов, осаживаемых выпуклыми продолговатыми плитами (1... $n$  – номера этапов деформирования)

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  $\sigma_m$  и деформаций  $e_m$  ( $m = 1, 2, 3$ ) совпадают с осями цилиндрических координат, т.е.  $m = \rho, \theta, z$  (монотонный процесс). Логарифмические деформации  $e_\rho, e_\theta$  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 ( $\Gamma$ ) 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  $\xi_i$  – 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  $\tau$ ,  $\tau_p^*$  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  $\infty$  (плоские плиты), т. е. величина радиусности  $R/D_0 = 0,75$ ; 1,25; 1,875; 2,5 и  $\infty$ . 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  $\varepsilon'$  наблюдается рост интенсивности деформации  $\Gamma$  как в продольном, так и в поперечном направлении заготовок, при этом использование смазки понижает  $\Gamma$  на 1,5–9,1 %. Уменьшение  $R/D_0$  также приводит к возрастанию  $\Gamma$  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  $\varepsilon'$  к наименьшей интенсивности роста  $\Gamma$  для заготовок с наибольшим  $R/D_0$ . При дальнейшей осадке, когда двойная бочка стремится перейти в одинарную, величина  $\Gamma$  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  $\Gamma$  для всех отношений  $R/D_0$  являются большими, чем для случая осадки плоскими плитами.

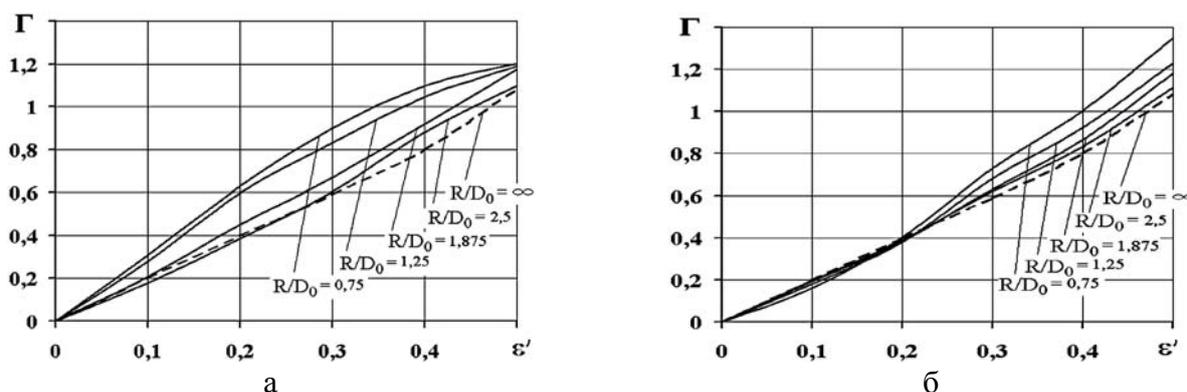


Рис. 2. Зависимость  $\Gamma(\varepsilon'; R/D_0)$  при осадке физических моделей сухими выпуклыми продолговатыми осадочными плитами с различной радиусностью  $R/D_0$ :

а – вдоль оси плит; б – поперек оси плит

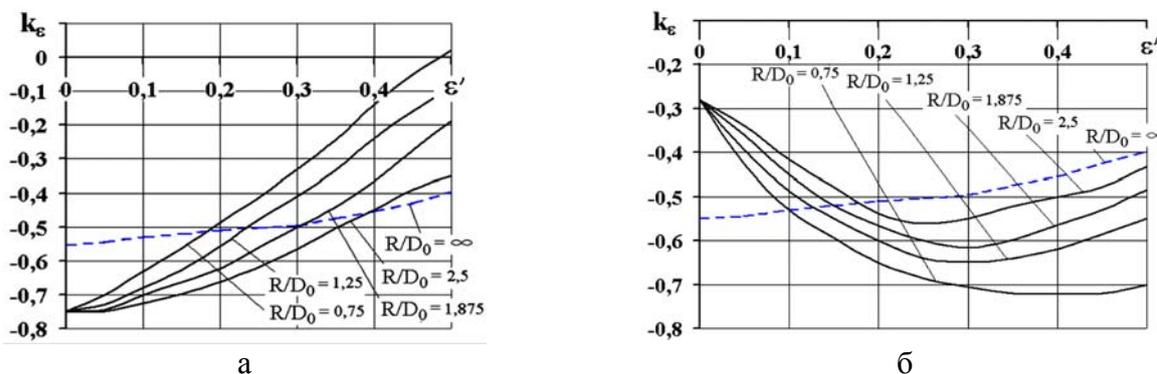


Рис. 3. Зависимость  $k_\varepsilon(\varepsilon'; R/D_0)$  при осадке физических моделей сухими выпуклыми продолговатыми осадочными плитами с различной радиусностью  $R/D_0$ :

а – вдоль оси плит; б – поперек оси плит

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

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  $k_{\varepsilon}$ , по сравнению с осадкой смазанными плитами. В поперечном направлении на начальных стадиях осадки наблюдается снижение  $k_{\varepsilon}$ , 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  $\varepsilon'$ , 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  $\varepsilon'$  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.

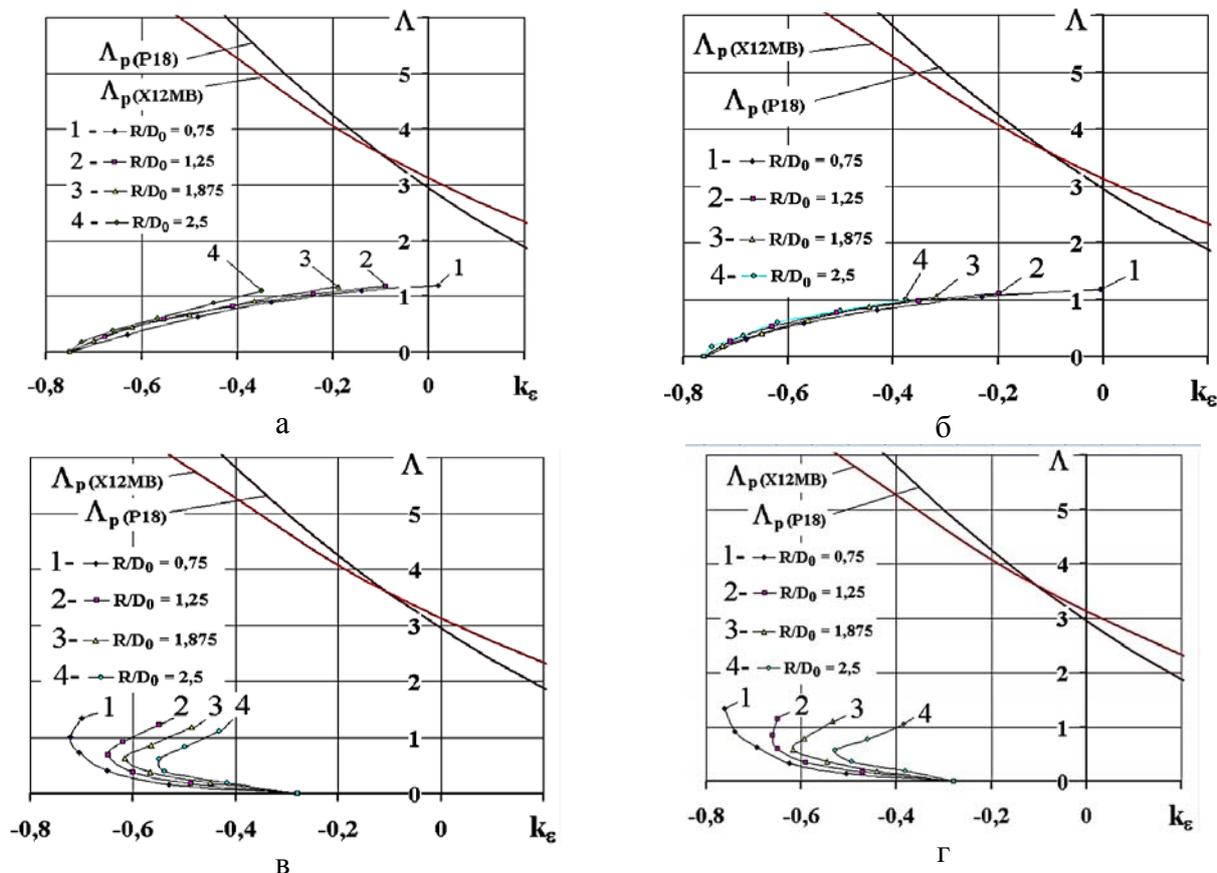


Рис. 4. Пути деформирования при осадке выпуклыми продолговатыми плитами с различным  $R/D_0$  и диаграммы пластичности сталей X12MB при 1140 °С и P18 при 1200 °С:

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  $\Psi$  как в продольном, так и в поперечном направлении с увеличением  $\varepsilon'$  (рис. 5). Наибольшие значения  $\Psi$  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.

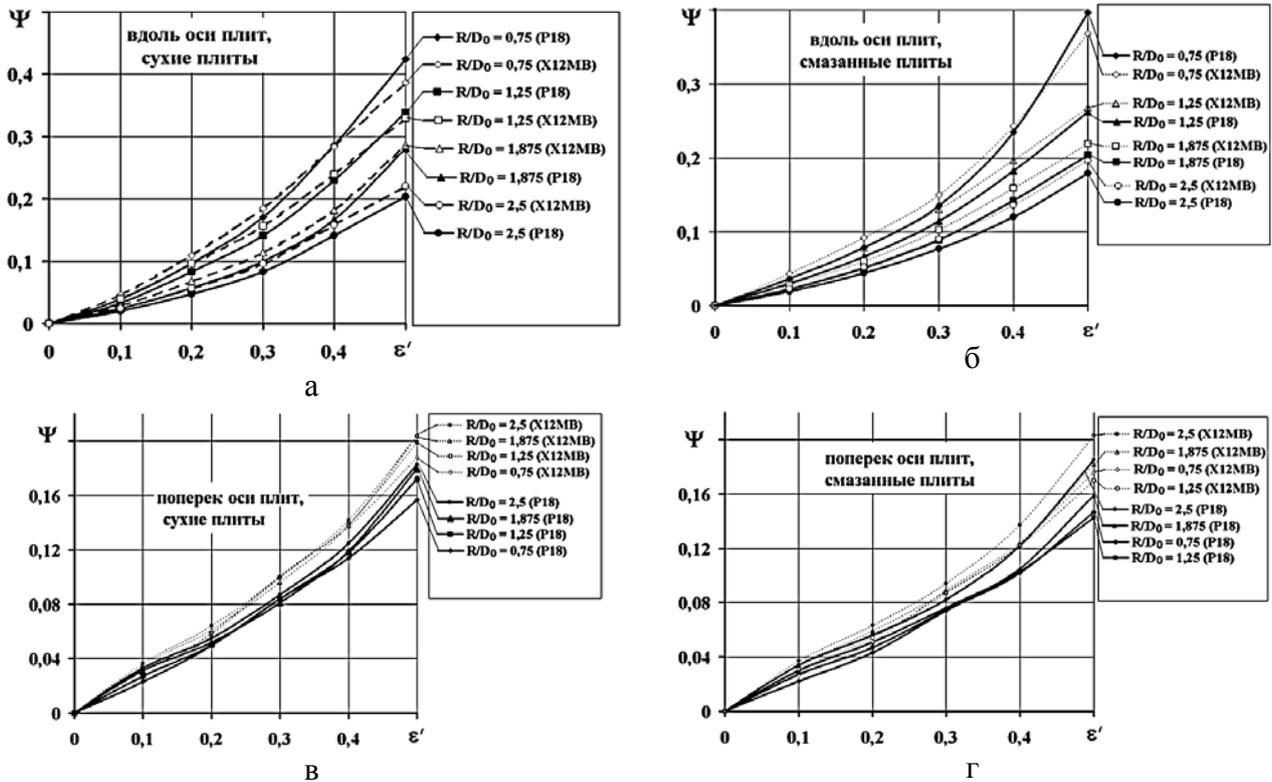


Рис. 5. СИЗП ( $\Psi$ ) при горячей осадке заготовок (X12MB и P18) выпуклыми продолговатыми плитами при различных  $R/D_0$ :

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

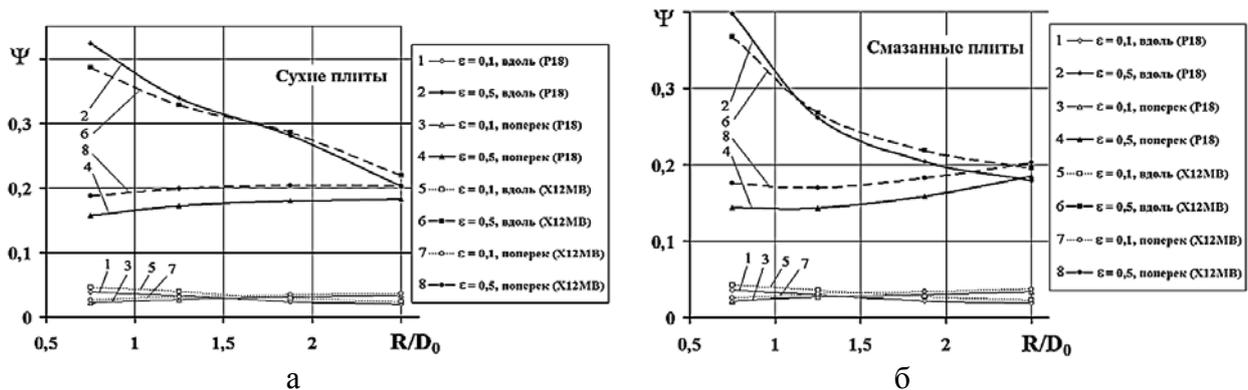


Рис. 6. Зависимость  $\Psi(R/D_0)$  при осадке заготовок (X12MB при 1140 °С и P18 при 1200 °С) до  $\varepsilon' = 0,1$  и  $\varepsilon' = 0,5$  выпуклыми продолговатыми плитами:

а – сухие плиты; б – смазанные плиты

Увеличение  $R/D_0$  приводит к снижению СИЗП заготовок в продольном направлении и слабому росту  $\Psi$  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 °С) и P18 (при 1200 °С), следовательно, разрушение заготовок является маловероятным. С увеличением степени деформации  $\varepsilon'$  происходит рост СИЗП, причем для стали X12MB при максимальных  $\varepsilon'$  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.