

УДК 621.73

Кухарь В. В.  
Суглобов Р. В.  
Данилова Т. Г.  
Мкртчян Е. А.  
Николенко Р. С.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ОСАДКЕ КОНИЧЕСКИМИ ПЛИТАМИ

Применение в технологиях кузнечно-штамповочного производства операции осадки заготовок или слитков плитами выпуклого профиля обычно преследует несколько целей: достижение более полной проработки литого металла и заварка дефектов в осевой зоне слитка [1], обеспечение технологичной формы полуфабриката для оптимизации формоизменения на последующих переходахковки или штамповки в штампах [2]. Одновременно происходит сбив с заготовки после газопламенного нагрева окалины [1, 2], что исключает её запрессовку в тело поковки, снижает вероятность дефектообразования и улучшает приемо-сдаточные показатели цеховой продукции. При этом, среди процессов осадки выпуклым рабочим инструментом, профилирование заготовок коническими плитами является наименее изученным.

Осадка коническими плитами при определенных характеристиках их профиля и условиях контактного трения приводит к снижению неравномерности деформации заготовки, что используется в известных методах определения коэффициента контактного трения при выборе эффективной технологической смазки [3]. Обычно в процессахковки и на подготовительных переходах штамповки технологические смазки не используют, а влияние условий трения на контакте плит и заготовок с отношением высоты  $H_0$  к диаметру  $D_0$  не менее 1,0 является незначимым [4]. Поэтому изменение профиля (конусности или угла при основании конуса) осадочной плиты влияет на формоизменение заготовки не только в месте вдавливания плиты в её торец, а и на формирование профиля боковой поверхности осаженого полуфабриката. В работе [5] выполнено экспериментальное изучение изменения показателей напряженно-деформированного состояния и степени использования запаса пластичности при осадке заготовок коническими плитами с различным углом при основании конуса. Однако, для выявления условий получения наиболее технологичной формы профилированного полуфабриката и обеспечения оптимального формообразования на дальнейших переходах, необходимо выявление закономерностей формоизменения заготовок на исследуемой операции. Сведения в данной области являются фрагментарными (например, имеется ограниченная информация о формоизменении на начальной стадии внедрения конического прошивня в торец заготовки [6]), что неоправданно сужает область технологического применения осадки заготовок коническими плитами в качестве подготовительного перехода. Также не известно влияние на формоизменение свойств материалов заготовок при определенных термомеханических и физико-геометрических условиях деформирования, что объективно обусловлено различием моделей (параметров кривых) упрочнения материалов.

Целью данной работы является исследование формоизменения цилиндрических заготовок сплошного поперечного сечения при осадке коническими рабочими плитами.

Наиболее мощными и современными исследовательскими инструментами для анализа процессов пластической деформации являются пакеты компьютерного конечно-элементного моделирования, один из которых (QForm) использовали для решения поставленной цели. Моделировали процесс осадки заготовок коническими плитами с углом при основании конуса (рис. 1)  $\angle \alpha = 12,5^\circ; 15,0^\circ$  и  $17,5^\circ$ . Начальный диаметр заготовки принимали  $D_0 = 25$  мм, а высоту –  $H_0 = 25$  мм и  $H_0 = 50$  мм, т. е.  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$  соответственно. Разбиение твердотельной компьютерной модели заготовки на сетку конечных элементов с определением их типов обеспечивали средствами компьютерного пакета, при этом соблюдали

условие непроницаемости конечных элементов модели рабочих плит в конечные элементы модели заготовки. В качестве материала заготовок выбраны Сталь 45 (температура деформации  $t = 1100$  °С) и медь марки М1 (температура деформации  $t = 850$  °С). Температурные условия принимали изотермическими. Коэффициент контактного трения для случая горячей осадки стальных заготовок задавали  $\mu = 0,32$ , для случая горячей осадки медных заготовок –  $\mu = 0,34$  [3]. В качестве технологического параметра, характеризующего степень обжатия заготовок при осадке коническими плитами, использовали отношение  $\varepsilon_h = \Delta h / H_0$ , где  $\Delta h = (H_0 - h_1)$  – рабочий ход инструмента, мм, причем  $h_1$  – расстояние между вершинами верхней и нижней конических осадочных плит после деформирования, мм (см. рис. 1, а). Практическое значение имеет формоизменение на установившейся стадии осадки, т. е. для  $\varepsilon_h \geq 0,3$ . Максимальное относительное обжатие ограничивали величиной  $\varepsilon_h = 0,5$ .

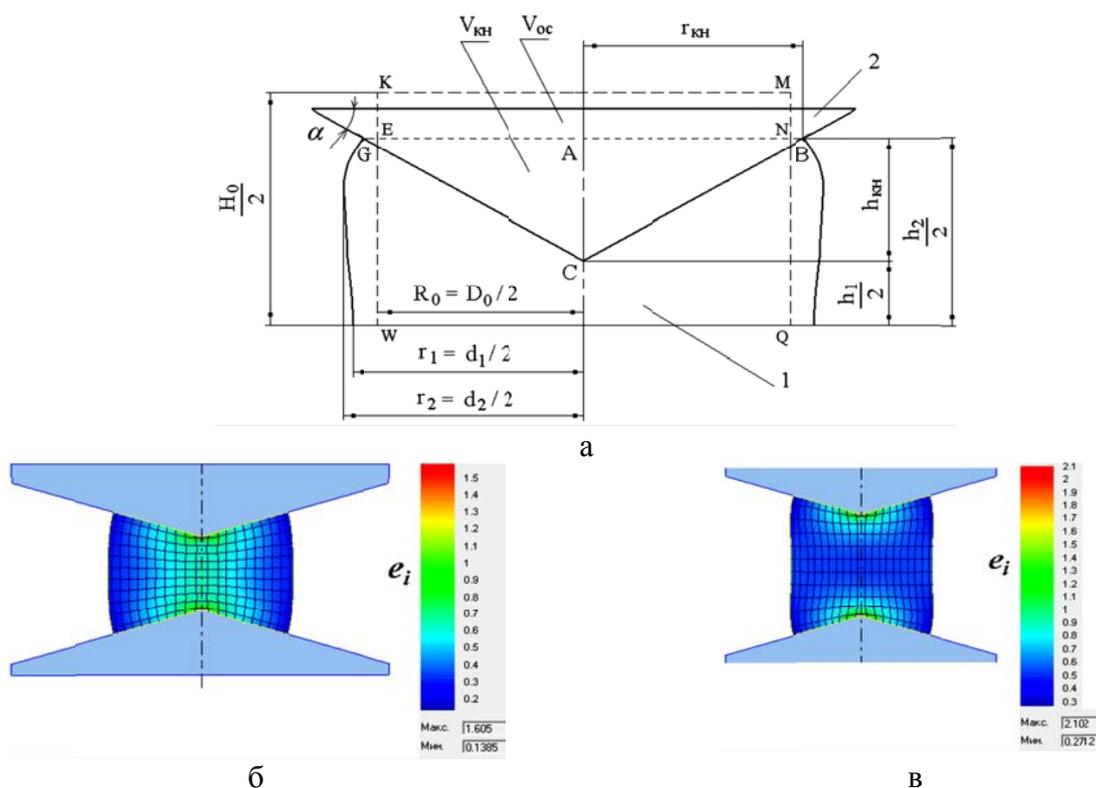


Рис. 1. Установившаяся стадия осадки заготовок коническими плитами:

а – схема обмера (верхняя половина) заготовки; б и в – модели осажённых до  $\varepsilon_h = 50\%$  заготовок (М1,  $t = 850$  °С) с  $H_0 / D_0 = 1,0$  и  $2,0$  соответственно при  $\alpha = 17,5^\circ$ ; 1 – заготовка с конечными размерами  $h_1, h_2, r_1, r_2$ ; 2 – верхняя конусная осадочная плита;  $V_{KH}$  – объем металла, вытесняемый конусом GBC, увеличивающийся по ходу осадки в связи с ростом величин  $r_{KH}$  и  $h_{KH}$ ;  $V_{OC}$  – смещенный относительно вертикальной оси объем металла KMNE;  $e_i$  – интенсивность деформации (шкала)

Скорость движения верхней осадочной плиты принимали  $v = 0,5$  м/с, что соответствует скорости перемещения ползунов кривошипных прессов и обеспечивает величину скорости деформации заготовок порядка  $\dot{\varepsilon} = 5 \dots 10$  с<sup>-1</sup>. Учет изменений свойств материалов заготовки в процессе деформирования при заданных условиях проводили, выбирая модели их упрочнения, предлагаемые библиотекой данных используемого пакета для конечно-элементного моделирования. Различие моделей упрочнения Стали 45 и меди М1 при заданных термомеханических условиях очевидно и подтверждается сравнением соответствующих графиков зависимостей  $\sigma_s = f(e_i, \dot{\varepsilon}, t)$ , приведенных, например, в справочнике [9].

В процессе моделирования определяли величины смещенных объемов как  $V_{см} = V_{кн2} + V_{ос2}$ , где  $V_{кн2} = 2 \cdot V_{кн}$  и  $V_{ос2} = 2 \cdot V_{ос}$  – удвоенные объемы по рис. 1, относящиеся к целой заготовке. Соответственно, истинную степень деформации  $e_h$  в высотном направлении находили как  $e_h = V_{см} / V_{заг}$ , где  $V_{заг} = \pi D_0^2 H_0 / 4$  – объем заготовки. Максимальное различие при компьютерном вычислении смещенных объемов для стальных и медных заготовок не превысило 0,8 %. Данная погрешность является пренебрежимо малой величиной и связана с отличиями генерирования сетки конечных элементов для материалов с различными свойствами. Таким образом, графики взаимосвязи между технологическим параметром  $\varepsilon_h$  и значениями  $e_h$  (рис. 2) для стальных и медных заготовок отличаться не будут.

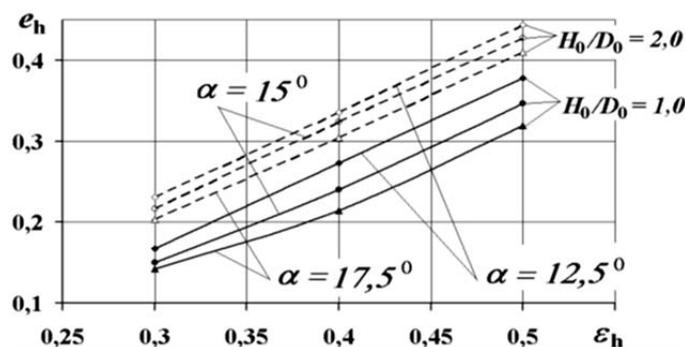


Рис. 2. Взаимосвязь между величиной относительного обжатия  $\varepsilon_h$  и степенью высотной деформации  $e_h$ , вычисленной через смещенные объемы, при осадке заготовок ( $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$ ) коническими плитами с  $\angle \alpha = 12,5^\circ; 15,0^\circ$  и  $17,5^\circ$

Учитывая, что характер зависимостей, приведенных на рис. 2, близок к линейному, то по результатам моделирования была составлена матрица полного факторного эксперимента (ПФЭ)  $2^3$  с учетом взаимодействия влияющих факторов ( $H_0/D_0$ ,  $\varepsilon_h$  и  $\alpha$ ), обработка которой позволила получить уравнение регрессии:

$$e_h = 0,287 + 0,035X_1 + 0,098X_2 - 0,017X_3 + 0,004X_1X_2 - 0,006X_2X_3 + 0,005X_1X_2X_3, \quad (1)$$

где  $X_1 = (H_0/D_0 - 1,5)/0,5$ ;  $X_2 = (\varepsilon_h - 0,4)/0,1$ ;  $X_3 = (\alpha - 15^\circ)/2,5^\circ$  – кодированные значения оговоренных влияющих факторов.

В качестве основных показателей формоизменения заготовки при горячей осадке коническими плитами выбраны величины  $h_2/H_0$ ;  $d_1/D_0$  и  $d_2/d_1$  (см. рис. 1,а), и построены графики их зависимостей от влияющих факторов для заготовок из стали и меди (рис. 3–5). Очевидно, что  $d_2/d_1 = r_2/r_1$ . При этом, формирование бокового профиля заготовки в виде двойной бочки с наличием величин  $r_1$  и  $r_2$  происходит при осадке относительно высоких заготовок с  $H_0/D_0 = 2,0$ . При формировании бокового профиля в виде одинарной бочки, что характерно для заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$ , принимали  $r_1 = r_{кн}$  (см. рис. 1, а), где  $r_{кн}$  – радиус окружности контакта заготовки с конической плитой.

График  $h_2/H_0 = f(\varepsilon_h; \alpha; H_0/D_0)$ , приведенный на рис. 3, показывает изменение высотного размера заготовки в зависимости от степени обжатия  $\varepsilon_h$ , угла при основании конуса  $\alpha$  осадочных плит и относительной высоты  $H_0/D_0$  исходной заготовки. Данный график является аналогичным известному из технической литературы [12] графику Цшейле, который используют для определения конечной высоты поковки при операции прошивки, в зависимости от конечной толщины дна поковки и отношения диаметра прошивня к исходному диаметру заготовки. Полученные зависимости изменения высотного размера от условий осадки коническими плитами стальных и медных заготовок качественно идентичны,

а количественные различия не существенны (не более 2 %), что связано с отличием коэффициентов контактного трения, различием сгенерированной сетки конечных элементов и т. п. Следовательно, влиянием реологических свойств материалов на высотное формоизменение заготовок при осадке коническими плитами можно пренебрегать.

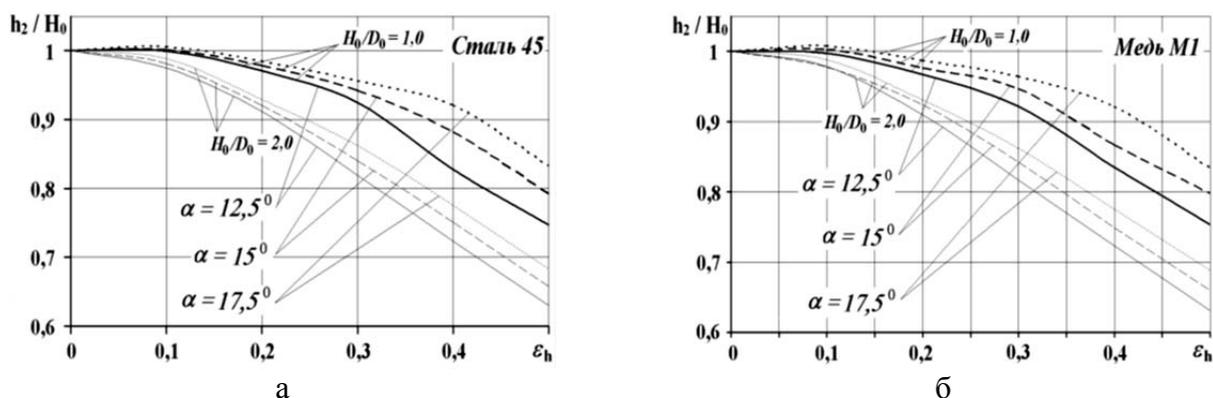


Рис. 3. График зависимости  $h_2/H_0 = f(\varepsilon_h; \alpha; H_0/D_0)$  для стальных (а) и медных (б) заготовок при осадке коническими плитами

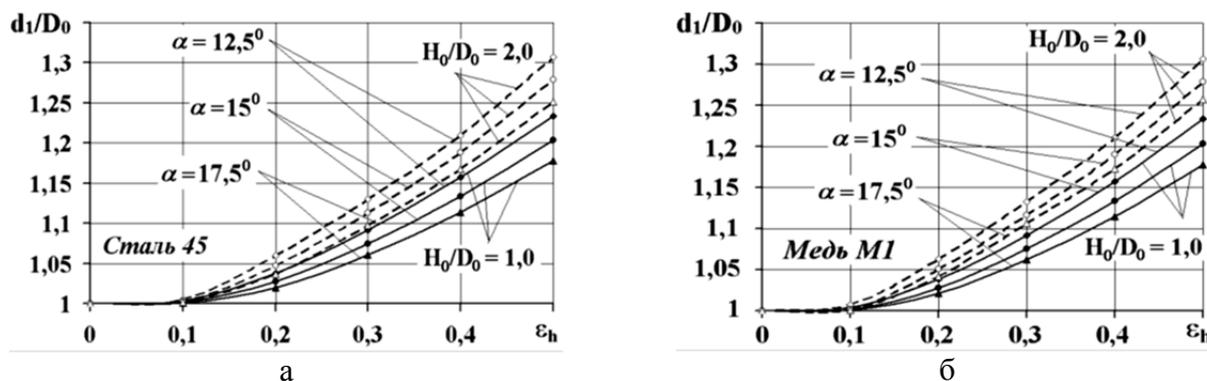


Рис. 4. График зависимости  $d_1/D_0 = f(\varepsilon_h; \alpha; H_0/D_0)$  для стальных (а) и медных (б) заготовок при осадке коническими плитами

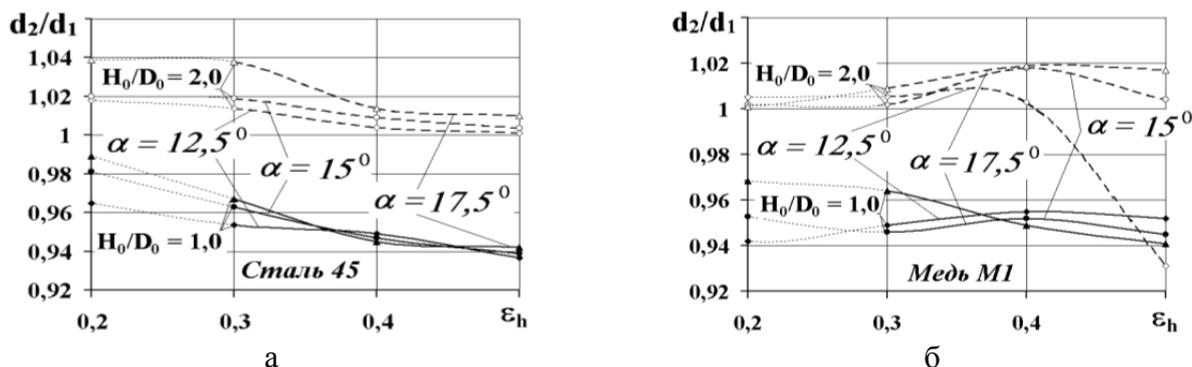


Рис. 5. График зависимости  $d_2/d_1 = f(\varepsilon_h; \alpha; H_0/D_0)$  для стальных (а) и медных (б) заготовок при осадке коническими плитами

График  $d_1/D_0 = f(\varepsilon_h; \alpha; H_0/D_0)$ , приведенный на рис. 4, показывает, что возрастание отношения  $H_0/D_0$  увеличивает конечный относительный диаметр по середине высоты заготовки при одинаковых обжатиях, что связано с большим объемом металла, участвующим в пластической деформации. Полученные зависимости изменения относительного среднего диаметра характеризуются его возрастанием при увеличении степени обжатия и уменьшением при увеличении угла у основания конуса. Данные зависимости для стальных

и медных заготовок качественно идентичны, а количественные различия весьма несущественны (до 1 %), что объясняется так же, как и в предыдущем случае. Следовательно, влияние реологических свойств материалов на изменение относительного срединного диаметра заготовок при осадке коническими плитами является незначимым.

График  $d_2/d_1 = f(\varepsilon_h; \alpha; H_0/D_0)$ , приведенный на рис. 5, описывает изменение неравномерности деформации заготовок по высоте. В общем случае, для заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  значения  $d_2/d_1$  меньше единицы, а для заготовок с  $H_0/D_0 = 2,0$  значения  $d_2/d_1$  больше единицы. При этом для медных заготовок наблюдается наличие максимумов на графиках, относящихся к осадке более высоких образцов. Полученные зависимости изменения величины отношения приторцевого ( $d_2$ ) диаметра к срединному диаметру ( $d_1$ ) для стальных и медных заготовок имеют качественные и количественные различия. Это свидетельствует о значительном влиянии реологических свойств материалов на изменение неравномерности деформации заготовок по высоте при осадке коническими плитами.

### ВЫВОДЫ

Получено уравнение взаимосвязи технологического параметра относительного обжатия с величиной истинной степени высотной деформации цилиндрической заготовки при осадке коническими плитами, учитывающее исходные размеры заготовки и геометрию (угол при основании конуса) осадочных плит. Установлены закономерности формоизменения заготовок при осадке коническими плитами, позволяющие определять размеры профилированной заготовки после деформирования в зависимости от её исходных габаритов, величины обжатия и конусности осадочных плит. Выявлено, что на неравномерность деформации по высоте осажённых полуфабрикатов существенное влияние оказывают реологические свойства материалов заготовок. Полученные результаты целесообразно использовать для усовершенствования технологических процессовковки и объёмной штамповки на основе подготовительного формоизменения заготовок осадкой профильными плитами.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технологія кування* / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 268 с.
2. Пат. 44484 Україна, МПК(2009) В 21 К 1/00, В 21J 5/00. *Спосіб штампуння 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.
3. Грудев А. П. *Трение и смазки при обработке металлов давлением : справочник* / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.
4. *Теория обработки металлов давлением* / Тарновский И. Я. [и др.] ; под ред. И. Я. Тарновского. – М. : Металлургиздат, 1963. – 672 с.
5. 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.
6. Ребельский А. В. *Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки* / А. В. Ребельский. – М. : Машиностроение, 1965. – 248 с.

Кухарь В. В. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ;  
Суглобов Р. В. – ст. преп. ПГТУ;  
Данилова Т. Г. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ;  
Мкртчян Е. А. – ассистент ПГТУ;  
Николенко Р. С. – магистр ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: kvv\_mariupol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2013 г.