

МАЛОУТХОДНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ШТАМПОВКА МЕДНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОКОВОК

Обоснована целесообразность комбинирования операций предварительного осаждения и прошивки заготовок вне гравюр штампов с операциями последующей завершающей штамповки в штампах при производстве осесимметричных поковок. Операции могут быть выполнены на различном оборудовании, при этом показана необходимость учета закономерностей бочкообразования заготовок при подготовительной осадке перед последующими штамповочными переходами. Предложена обобщенная методика проектирования технологий комбинированной штамповки осесимметричных поковок, учитывающая закономерности формоизменения на операциях осадки и прошивки. Выполнено промышленное внедрение более совершенной технологии комбинированной горячей объемной штамповки поковки «Головка кислородной фурмы», позволившее сэкономить до 7,7 % технической меди на каждом изделии.

Ключевые слова: заготовка, подготовительная осадка, прошивка, горячая объемная штамповка, осесимметричная медная поковка.

Введение. Осесимметричные поковки, изготавливаемые с применением операций предварительной осадки заготовок в торец, являются весьма распространенными изделиями, штампуемыми на кривошипных горячештамповочных прессах. Такие поковки, включенные в первую группу соответствующей классификации [1], штампуют в открытых и закрытых штампах. Среди представителей круглых в плане поковок достаточно много изделий из меди и медных сплавов. Проектирование технологических процессов штамповки поковок из цветных металлов и сплавов должно осуществляться с учетом технологических и теплофизических свойств материала заготовки для исключения его разрушения и подсыхания, включать анализ вариантов изготовления детали с минимальными затратами металла и труда [2]. При этом на этапах выбора переходов штамповки и конструирования ручьев штампов следует учитывать закономерности формоизменения материала при выбранной схеме деформирования и заданных термомеханических условиях. Применение операции подготовительной свободной осадки заготовок при технологическом проектировании требует принимать во внимание закономерности бочкообразования медных заготовок, которые, при прочих равных условиях, количественно, а иногда и качественно, отличаются от закономерностей бочкообразования стальных заготовок и в настоящее время изучены недостаточно.

Анализ последних исследований и публикаций. Операция осадки, в том числе бойками различной конфигурации, наиболее соответствует одному из принципов проектирования энергоэффективных технологий штамповки – принципу максимума свободных внеконтактных поверхностей, сформулированному И.М. Володиным [3]. Деформирование сопровождается бочкообразованием заготовки, т.е. формированием профиля боковой поверхности, что позволяет предложить ряд безручьевых способов подготовительного профилирования заготовок [4]. Для прогнозирования формоизменения с некоторой погрешностью пользуются данными, полученными при осадке свинцовых образцов, используемых для физического моделирования процессов горячей деформации. Данный подход не учитывает количественную разницу размеров бокового профиля заготовок из разных материалов при различных условиях деформирования [5, 6]. Это может привести к неправильному назначению линии разреза штампов, незаполнению гравюр материалом, чрез-

мерному вытеканию металла в облой, повышенному износу штампов. Поэтому часто при моделировании процессов осадки для отражения адекватной картины формоизменения предварительно экспериментально получают зависимости напряжений от деформаций при заданных скоростях деформирования и температурах [7, 8], которые используют в пакетах конечно-элементного анализа.

Различия показателей бочкообразности при осадке заготовок из разных материалов объясняются объективными причинами. Во-первых, из-за отличия коэффициентов трения на контакте материалов «сталь-медь», «сталь-свинец», «сталь-сталь» и т.п., причем выделение влияния таких факторов как температура, скорость и степень деформации, размеры заготовок является затруднительным [9]. Давление металла на инструмент в процессе осадки также непостоянно. Во-вторых, на количественные показатели формоизменения оказывают влияние реологические свойства материалов, т.е. форма кривой упрочнения при заданных термомеханических условиях [9]. Классические представления, опирающиеся на принципы постоянства объема и наименьшего сопротивления, не берут во внимание влияние реологических свойств материалов на конечное формоизменение, различие которого объясняется только разными коэффициентами контактного трения, а, следовательно, различным объемом металла, вовлеченного в жесткие приконтактные зоны, и различными размерами очага деформации [5, 6]. В настоящее время преобладающим является мнение, что влиянием свойств материалов на количественные показатели формоизменения пренебрегать нельзя [9, 10].

Известны исследования процессов деформации материалов на основе меди при повышенных температурах [11], на основании которых усовершенствована технология производства круглых в плане изделий электротехнического назначения. В работе [12] выполнен анализ влияния исходной формы боковой поверхности медных заготовок и условий контактного трения на конечное формоизменение полуфабриката, при этом для практических целей предложены специальные карты трения и методика определения оптимальной формы бокового профиля заготовки перед осадкой. Следует отметить, что данные исследования проведены только для условий холодной деформации при комнатной температуре заготовки, а указанную методику трудно реализовать на практике из-за сложностей предварительной профилировки заготовок на вогнутый профиль боковой поверхности.

В работе [13] выполнено исследование закономерностей бочкообразования заготовок из меди марки М1 при осадке в холодном (18 °) и горячем (850 °С) состоянии. Данные закономерности целесообразно учитывать при проектировании энергоресурсосберегающих технологий штамповки круглых в плане поковок для формирования рациональной формы предварительного полуфабриката.

Цель работы, постановка задач. Целью настоящей работы является разработка малоотходных технологий комбинированной горячей объемной штамповки осесимметричных поковок из меди на основе установления рациональных режимов предварительной осадки заготовок.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основании модели бочкообразования заготовок при осадке разработать обобщенную методику проектирования технологий комбинированной штамповки осесимметричных поковок из цветных металлов, при этом учесть возможность комбинирования операций осадки, прошивки, предварительной и окончательной штамповки;
- усовершенствовать технологию горячей объемной штамповки осесимметричной медной поковки применительно к конкретным производственным условиям.

Материалы исследования. Известно, что на прессовом оборудовании для получения простых стальных поковок необходимы один – три ручья, а для сложных поковок – до пяти ручьев, включая осадку [1]. При штамповке же цветных металлов применение мно-

горючевых штампов зачастую нецелесообразно, т.к. после каждой деформирующей операции необходимо удалять дефекты на поверхности заготовок [2].

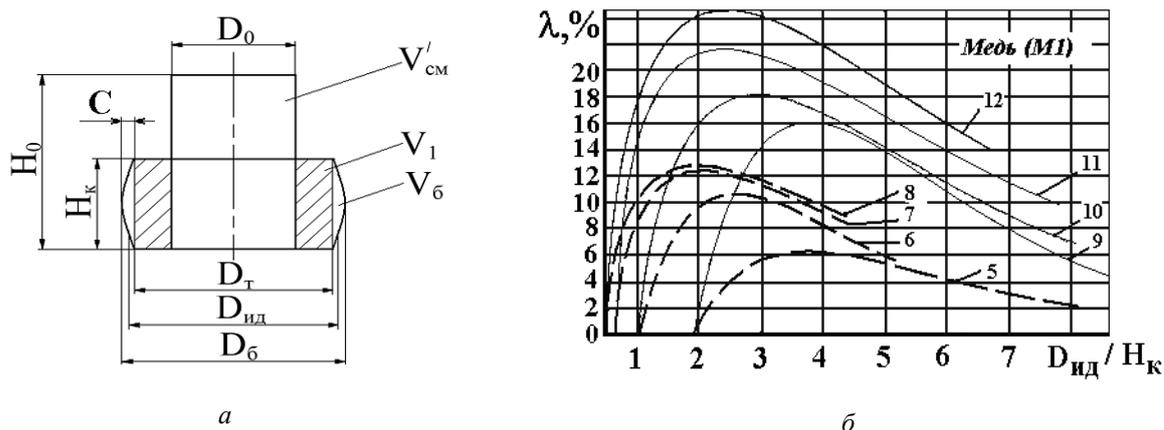


Рис. 1. Бочкообразность заготовок при осадке:

a – баланс объемов заготовки при осадке плоскими плитами: *C* – прогиб образующей бочки; *Dб, Dт, Dид* – конечные диаметральные размеры; *Vб, V1* и *Vсм* – конечные объемные характеристики и смещенный объем заготовки; *b* – изменение коэффициента бочкообразности медных заготовок в процессе осадки при различных начальных коэффициентах контакта (*D0/H0*):

5 – 18 °С, $D_0/H_0 = 1,899$; 6 – 18 °С, $D_0/H_0 = 1,026$; 7 – 18 °С, $D_0/H_0 = 0,65$; 8 – 18 °С, $D_0/H_0 = 0,502$;
9 – 850 °С, $D_0/H_0 = 1,917$; 10 – 850 °С, $D_0/H_0 = 1,034$; 11 – 850 °С, $D_0/H_0 = 0,676$; 12 – 850 °С, $D_0/H_0 = 0,511$

Как правило, используют два метода штамповки на прессах [2]: а) из предварительно подготовленной заготовки, получаемой открытой ковкой на плоских или фасонных бойках; б) из мерной заготовки без предварительной подготовки. В первом случае подготовленную фасонную заготовку штампуют в одноручьевом штампе с одним или несколькими нагревами. Заполнение полости штампа металлом зависит от формы полуфабриката и штамповочного ручья, а схемы деформирования следует выбирать такими, при которых получение требуемой формы происходит за счет выдавливания, а не за счет осадки [2], что также является отличительной особенностью технологий штамповки поковок из цветных металлов. Многопереходную штамповку осуществляют в одном штампе или специальных предварительных штампах, постепенно доводящих форму заготовки до окончательных размеров поковки. Предварительные переходы рассчитывают так же, как и для поковок, штампуемых из конструкционных сталей. При этом подготовительная осадка медных заготовок под штамповку поковок типа дисков, сопровождающаяся интенсивным бочкообразованием (рис. 1), способствует лучшему заполнению гравюр, т.е. служит для фасонирования заготовок.

Бочкообразность при осадке оценивают коэффициентом λ [6]:

$$\lambda = (V_{\text{б}} / V_{\text{заг}}) \times 100\%, \quad (1)$$

где $V_{\text{заг}}$ и $V_{\text{б}}$ – объем заготовки и объем, образующий бочку соответственно (см. рис. 1, а).

Исходную заготовку принимают идеализированной с начальными диаметром D_0 и высотой H_0 . На рис. 1, б приведены графические зависимости коэффициента бочкообразности λ для медных заготовок (марка М1) от изменяющегося с увеличением степени деформации ε при осадке коэффициента контакта $D_{\text{ид}} / H_{\text{к}}$, где $D_{\text{ид}} = D_0 / \sqrt{1 - \varepsilon}$ – идеальный диаметр при равномерной осадке заготовки; соответственно $H_{\text{к}} = H_0 (1 - \varepsilon)$ – конечная высота заготовки после осадки. Соответственно, показатель λ , необходимый для

инженерных расчетов формоизменения, для материала при заданных условиях деформирования зависит от начального коэффициента контакта D_0 / H_0 и степени деформации при осадке $\varepsilon = (H_0 - H_k) / H_0$, которую можно выразить через текущий коэффициент контакта $D_{уд} / H_k$.

На основе анализа закономерностей изменения коэффициента бочкообразности λ при осадке, полученных в работе [13], установлено, что семейство кривых $\lambda = f(D_{уд} / H_k; D_0 / H_0)$ удовлетворительно описывается экспоненциальная модель:

$$\lambda = a_0 \cdot \frac{D_0}{H_0} \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)^{3/2}} - 1 \right)^{a_1} \cdot \exp \left[-a_2 \cdot \frac{D_0}{H_0} \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)^{3/2}} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты, найденные после обработки результатов эксперимента.

Значения коэффициентов a_0 , a_1 и a_2 находили методом перебора по аргументу при помощи разработанного специального программного обеспечения [13]. Для условий горячей (850 °С) осадки медных (М1) заготовок получены зависимости данных коэффициентов от начального коэффициента контакта:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 8,384 \cdot (D_0 / H_0)^2 - 24,674 \cdot (D_0 / H_0) + 39,88; \\ a_1 &= 0,388 \cdot e^{0,495 \cdot (D_0 / H_0)}; \quad a_2 = 0,211 \cdot e^{0,488 \cdot (D_0 / H_0)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Средняя погрешность между расчетами коэффициента бочкообразности λ по модели (2), с учетом зависимостей (3), и данными эксперимента для меди М1 составляет 13 %. Сравнение значений коэффициента λ для геометрически подобных заготовок, осажённых до одинаковых степеней осадки ε при различных условиях, показало, что расчеты по модели Я.М. Охрименко [6] при горячей осадке меди приводят к занижению результатов до 6 % (следует отметить, что для случая холодной осадки меди наблюдается занижение результатов до 44 %).

После вычисления параметра λ проводят инженерные расчеты конечных размеров:

$$D_T = D_{уд} \sqrt{1 - 0,01\lambda}; \quad C = \frac{3}{4} D_T \left(\sqrt{1 + \frac{0,01\lambda}{1 - 0,01\lambda}} - 1 \right) \left. \right\} \Rightarrow D_0 = D_T + 2C. \quad (4)$$

Горячую объемную штамповку медной (М1) поковки «Головка кислородной фурмы» в условиях кузнечно-прессового цеха ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» (в настоящее время цех находится в составе ООО «Метинвест – Мариупольский ремонтно-механический завод») проводили после порезки медного прутка $\varnothing 90$ мм на мерные заготовки длиной $H_0 = 119$ мм. Резку осуществляют в штампах кривошипного пресса с номинальной силой 4 МН. Технический контроль выполняют линейкой и штангенциркулем после наружного осмотра. Нарезанные мерные заготовки передают на кузнечный участок к нагревательным печам. Согласно технологической инструкции заготовки нагревают в газопламенной печи камерного типа до $t = 850 \dots 900$ °С, далее производят осадку заготовки и прошивку в подкладном кольце. После этого заготовки подогревают и осуществляют предварительную штамповку. Осадку, прошивку и предварительную штамповку в подкладном штампе, закрепляемом в хоботе кузнечного манипулятора, согласно изложенным выше рекомендациям, проводят на паровоздушном ковочном молоте. Для окончательной штамповки в размер поковки передают на кривошипный пресс (4 МН). Образовавшийся заусенец убирают механическим способом.

Учитывая, что прошивку заготовки проводят после осадки, то формулу А.В. Ребельского [14] для вычисления конечного наружного диаметра (D) прошитой заготовки записывали как

$$D = D_{\text{ид}} \sqrt{1 + \varepsilon_{\text{np}} (d / D_{\text{ид}})^2}, \quad (5)$$

где d – диаметр прошивня;

$\varepsilon_{\text{np}} = 1 - h_{\text{np}} / H_{\kappa}$ – условная степень деформации при прошивке, здесь h_{np} – толщина дна заготовки при глухой прошивке.

Откуда, после преобразований, получили:

$$\varepsilon = 1 - \frac{D_0^2}{D^2 - \varepsilon_{\text{np}} d^2}. \quad (6)$$

Диаметр заготовки после прошивки должен быть меньше на 3...5 мм диаметра гравюры предварительного ручья штампа, который составляет 150 мм (диаметр заготовки, отштампованной в данном штампе, рис. 2, з). Откуда принимали $D = 147$ мм (рис. 2, в). Учитывая условия поставки меди, расчеты проводили при сохранении диаметра исходной заготовки $D_0 = 90$ мм (рис. 2, а), а также диаметра прошивня $d = 42$ мм (рис. 2, в). При сквозной прошивке $\varepsilon_{\text{np}} = 1$. Тогда, после вычислений по формуле (6), имеем: $\varepsilon = 0,58$ (т.е. 58 %), откуда получили $D_{\text{ид}} = 139$ мм. Объем гравюры для поковки составляет $V = 744000$ мм³. Тогда конечная высота заготовки после осадки: $H_{\kappa} = V / (0,785 D_{\text{ид}}^2) = 744000 / (0,785 \cdot 139^2) = 49$ мм. Это позволило рассчитать начальную высоту заготовки: $H_0 = H_{\kappa} / (1 - \varepsilon) = 49 / (1 - 0,58) = 117$ мм. Вычисляли отношения $h_{\text{np}} / H_{\kappa} = 0$ и $d / D_{\text{ид}} = 0,302$. Воспользовавшись графиком Цшейле (приведен, например, в источнике [15, стр. 332]), находили $(H_{\kappa, \text{np}} / H_{\kappa}) = 0,99$, где $H_{\kappa, \text{np}}$ – высота заготовки после прошивки.

Расчеты проверяли по условию образования бочки при осадке и её развития при прошивке. Отношение $D_0 / H_0 = 90 / 117 = 0,77$ и $D_{\text{ид}} / H_{\kappa} = 139 / 49 = 2,83$. Тогда, по выражениям (2) и (3) рассчитывали коэффициент бочкообразности: $\lambda = 0,207$. Проведя вычисления по формулам (4), получили: $D_T = 124$ мм, $D_{\sigma} = 146$ мм (рис. 2, б).

Выполняли учет развития бочкообразования (λ_{np}) при прошивке:

$$\lambda_{\text{np}} = \frac{\lambda}{\sqrt[3]{(H_{\kappa, \text{np}} / H_{\kappa})}}. \quad (7)$$

Откуда: $\lambda_{\text{np}} = 0,208$. Размеры прошитой заготовки: $H_{\kappa, \text{np}} = 48,5$ мм, $D_T = 124$ мм, $D = 147$ мм (см. рис. 2, в). Эквивалентный коэффициент подкатки при данных условиях составляет $K_{\text{но}} = 1,113$, что соответствует формовочному или пережимному ручью [1]. Таким образом, подтвердили, что деформированная заготовка свободно размещается в гравюре предварительного ручья (рис. 3). Отметим, что по базовой технологии $\varepsilon = 0,55$. Принимаемая длина $H_0 = 117$ мм, что отличается от базовой технологии на 2 мм.

Штамповка по усовершенствованной технологии (см. рис. 3) внедрена в условиях кузнечно-прессового цеха ПАО «ММК им. Ильича» (ООО «Метинвест – Мариупольский ремонтно-механический завод»). При этом поковки отштамповывали на кривошипном прессе в закрытом штампе «в размер», образование заусенца не происходило. Разработанные мероприятия позволили достигнуть экономии меди (M1) до 7,7 %.

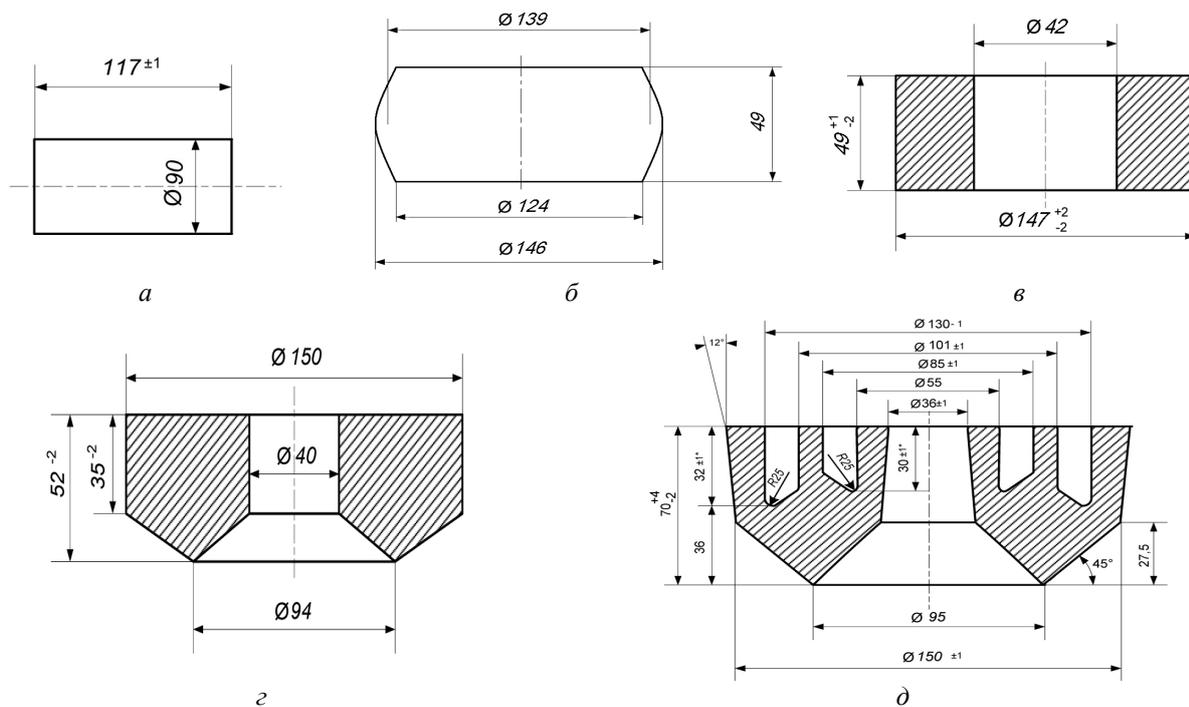
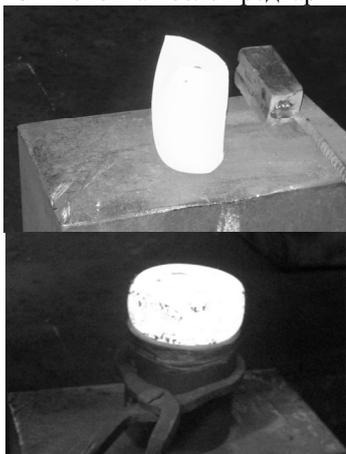
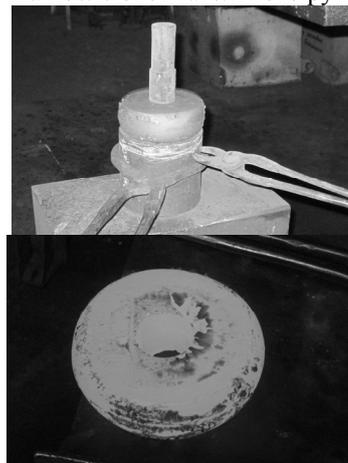


Рис. 2. Эскизы переходов штамповки поковки «Головка кислородной фурмы»:
а – мерная заготовка, *б* – заготовка после осадки, *в* – заготовка после прошивки,
г – поковка после предварительного ручья, *д* – поковка после окончательного ручья



а



б



в

Рис. 3. Промышленное внедрение штамповки «Головки кислородной фурмы»:

а – заготовка и подготовительная осадка; *б* – прошивка и прошитая заготовка;
в – предварительная и окончательная штамповка (фотографии оборудования и поковок)

Выводы. Разработана обобщенная методика проектирования технологий комбинированной объемной штамповки осесимметричных поковок, учитывающая закономерности формообразования полуфабриката на предварительных операциях осадки и прошивки. В производственных условиях внедрена более совершенная технология штамповки поковки

«Головка кислородной фурмы», которая позволила достичь экономии до 7,7 % технической меди на каждом изделии.

Литература

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. [Текст] / Ред. совет: Е. И. Семенов [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е. И. Семенова. – 1986. – 592 с.
2. Ковка и штамповка цветных металлов: справочник [Текст] / Н. И. Корнеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 229 с.
3. Володин И. М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на её основе технологии [Текст] / И. М. Володин, А. А. Ромашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 19–29.
4. Гринкевич В. А. Бесштамповое профилирование на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях [Текст] / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – № 5. – 2010. – С. 19–23.
5. Воронцов А. Л. Определение формы боковой поверхности заготовки при осадке [Текст] / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7–16.
6. Охрименко Я. М. Теория процессов ковки [Текст] / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин – М.: Высш. шк., 1977. – 295 с.
7. Jerzy Kajtoch. Strain in upsetting process [Текст] / Jerzy Kajtoch // Metallurgy and foundry engineering. – 2007. – Vol. 33. – № 1. – P. 51-61.
8. Tahir Altinbalik. An upper bound analysis and determination of the barreling profile in upsetting [Текст] / Tahir Altinbalik, Yilmaz Çan // Indian Journal of Engineering & Material Sciences. – December, 2011. – Vol. 18. – P. 416-424.
9. Inverse analysis applied to the evaluation of friction and rheological parameters in hot forming of steel [Текст] / Szyndler D., Pietrzyk M., Lenard J.G., Fyke S.H. // Proc. 8th International Conference Metal Forming' 2000, Sept. 3-7.2000. – Krakow; Poland, 2000. – P.101–106.
10. Shlomchack G. G. Rheological complexity of metals and anomalies of their deformation [Текст] / G. G. Shlomchack, A. M. Melnik, I. Mamuzič // Metallurgija. – Zagreb, 1996. – Vol. 35, Br. 2. – P. 83–86.
11. Gaponova O. Deforming of the copper-titanium powder materials at elevated temperatures [Текст] / O. Gaponova, L. Ryabicheva // International Conference Deformation and fracture in structural pm materials DF PM 2008 Proceedings. – Stará Lesná, High Tatras, Slovak Republic, 2008. – P. 202–206.
12. Rajeev Arya. Near net shape upsetting of cooper billet using friction determination curve [Текст] / Rajeev Arya, Kuldip Singh Parihar, Pritesh Prajapati // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. – January-March, 2012. – Vol. 1, Issue II. – P. 51–54.
13. Кухарь В. В. Бочкообразование при осадке черных и цветных металлов и сплавов [Текст] / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко // Труды международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». 26–28 сентября 2007 г. – Санкт-Петербург: из-во СПбГПУ, 2007. – С. 347–351.
14. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки [Текст] / А. В. Ребельский; под. ред. С. С. Соловцова. – М.: Машиностроение, 1965. – 248 с.
15. Теория обработки металлов давлением [Текст] / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго [и др.]; под ред. И. Я. Тарновского. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.

© В.В. Кухарь

МАЛОВІДХОДНЕ КОМБІНОВАНЕ ШТАМПУВАННЯ МІДНИХ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОКОВОК

Обґрунтована доцільність комбінування операції попереднього осаджування та прошивки заготовок поза гравюрами штампів з операціями наступного завершального штампування у штампах при виробництві вісесиметричних поковок. Операції можуть бути виконані на різному устаткуванні, при цьому показана необхідність врахування закономірностей діжкоутворення заготовок при підготовчому осаджуванні попереду наступних штампувальних переходів. Запропоновано узагальнену методику проектування технологій комбінованого штампування вісесиметричних поковок, що враховує закономірності формозміни на операціях осаджування та прошивки. Виконано промислове впровадження більш досконалої технології комбінованого гарячого об'ємного штампування поковки «Головка кисневої фурми», що дозволило економити до 7,7 % технічної міді на кожному виробі.

Ключові слова: заготовка, підготовче осаджування, прошивка, гаряче об'ємне штампування, вісесиметрична мідна поковка.

THE LOW-WASTE COMBINED DIE-FORGING OF COPPER AXISYMMETRIC FORGINGS

The expediency of a combination of operations of preliminary upsetting and drifting of billets outside of dies' gravures with operations of consequent completing die-forging by manufacture of axisymmetric forgings is justified. Operations can be executed on the different equipment, thus necessity of the account of regularities of buckling of billets is shown at a preparatory upsetting before consequent die-forging transitions. The generalized technique of designing of technologies of the combined die-forging of the axisymmetric forgings, taking into account regularities of a form-changing on operations of a upsetting and drifting is offered. The industrial introduction of more perfect technology of the combined hot volumetric die-forging of the forging-part “the Head of an oxygen nozzle” is executed, allowed to save up to 7,7 % of a technical copper on each workpiece.

Keywords: billets, preliminary upsetting, drifting, hot volumetric die-forging, axisymmetric copper forgings.