

Кухарь В.В.ГВУЗ «Приазовский государственный
технический университет»,
г. Мариуполь, Украина
E-mail: kvv_mariupol@mail.ru**БАЛАНС СМЕЩЕННОГО ОБЪЕМА
ПРИ ОСАДКЕ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ
УСЛОВИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

УДК 621.73

Обоснована необходимость учета неравномерности деформации при осадке заготовок плоскими плитами и показано влияние термомеханических режимов деформирования и трибоконтактных условий на величину реализующегося бочкообразования. Разработана методика составления баланса смещенного объема при осадке, включающая объем металла, приходящегося на образование бочкообразной части, величина которой зависит от условий деформирования. Выполнено сравнение долей деформации в балансе смещенных объемов, приходящихся на формообразование бочки заготовок из различных материалов, осажённых при разных условиях.

Ключевые слова: осадка заготовки, смещенный объем, коэффициент бочкообразности, условия на контактных поверхностях, реологические свойства, условия деформирования.

Введение

Осадка заготовок является наиболее распространенной операцией обработки металлов давлением. Данный процесс используют в технологияхковки для улучшения проработки литого металла слитков, объемной штамповки для приближения формы заготовки к конфигурации поковки, в экспериментальной механике в качестве метода определения технологических свойств материала (испытания образцов на осадку по ГОСТ 8817-73). В зависимости от сложности поковки подготовительная осадка может комбинироваться с операциями формовки, выдавливания и т.д. Форма боковой поверхности качественно и количественно зависит от условий на контакте заготовки с осадочными плитами, размеров и материала заготовки, скорости деформирования, температуры деформации и других факторов, отдельное влияние которых выделить крайне сложно. Обеспечение требуемой формы и размеров боковой поверхности позволяет достигать лучшей подготовки формы заготовки под поковку, более точно проектировать штамповый инструмент для окончательных переходов штамповки с повышением его стойкости, снизить расход материала. Следовательно, актуальной научно-практической задачей является расчет общего баланса металла заготовки при осадке, включая объем, образующий боковую поверхность («бочку»).

Анализ известных исследований и публикаций

Заготовки, подвергаемые осадке параллельными плитами, приобретают бочкообразную форму. Причем, в случае исходного отношения высоты H_0 к диаметру D_0 заготовки около 2,0, на начальных степенях деформации наблюдается двойная бочкообразность, которая переходит в одинарную бочку с увеличением степени деформации $\varepsilon = (H_0 - H_k) / H_0$, где H_k – конечная высота осажённой заготовки. Процессы одинарного и двойного бочкообразования были подробно описаны в начале – середине двадцатого века в фундаментальных трудах Я.М. Охрименко, И.М. Павлова, Л.Н. Соколова, В.Н. Трубина, В.А. Тюрина и других ученых, которые, однако, считали, что величина бочкообразности зависит только от условий контактного трения, а свойства материала при условиях деформирования влияние на формообразование не оказывают. Указанные работы были выполнены с использованием экспериментальных и экспериментально-аналитических методов.

Исследуя баланс металла заготовки при переходе с боковой поверхности на контактную, Я.М. Охрименко ввел понятие коэффициента бочкообразности λ , который характеризует неравномерность деформации в процессе осадки. Данный коэффициент, вычисляемый как отношение объема V_6 образованной бочки к объему $V_{заг}$ заготовки, находят из эксперимента:

$$\lambda = (V_6 / V_{заг}) \times 100 \% . \quad (1)$$

Для теоретического исследования бочкообразования при осадке представители Уральской школы обработчиков металла давлением (И.Я. Тарновский, О.А. Поздеев, О.А. Ганаго, В.Л. Колмогоров и др.) использовали прямые вариационные методы с заданием функции неравномерности радиальных деформаций. При этом, для учета влияния на формоизменение состояния трущихся поверхностей и размеров очага деформации (заготовки), ими был введен безразмерный эмпирический показатель Ψ :

$$\Psi = \mu + \frac{1}{8} \cdot \frac{D_0}{H_0} (1 - \mu) \sqrt{\mu} , \quad (2)$$

где μ – коэффициент контактного трения.

Для учета влияния трибоконтактных условий на энергосиловые параметры Е.П. Унковым разработан инженерный метод (совместное решение уравнений равновесия с условиями пластичности), позволивший выявить качественные различия эпюр сил трения при различных условиях пластической осадки. А.Д. Томленовым проведен теоретический анализ процессов осадки и высадки, основанный на методе линий скольжения. Установление количественной взаимосвязи между показателем бочкообразности и условиями на контакте заготовки с осадочными плитами позволило С.И. Губкину разработать метод определения коэффициента контактного трения. Данный метод получил дальнейшее развитие в трудах А.П. Грудева, Ю.В. Зильберга. Отличием подхода является использование показателя бочкообразности θ , определяемого по линейным размерам осаженой заготовки:

$$\theta = (D_{\bar{o}} - D_m) / D_{\bar{o}}, \quad (3)$$

где $D_{\bar{o}}$ и D_m – диаметры бочки и торца осаженой заготовки соответственно.

Существенное влияние контактных условий на форму боковой поверхности заготовок при осадке подтверждают теоретические и экспериментальные результаты, полученные А.Л. Воронцовым [1]. Также данным ученым, совместно с А.М. Дмитриевым, выполнено обобщение теоретических основ осадки и высадки цилиндрических заготовок. В работе И.В. Добрава [2], на примере осадки заготовок плоскими плитами, выявлены условия подобия процессов, происходящих на трущихся поверхностях твердых и пластически деформируемых тел.

Современное развитие метода конечных элементов значительно расширяет возможности теоретического анализа процессов формоизменения. С применением пакетов для конечно-элементного анализа в работах [3, 4] проведены исследования изменения формы алюминиевых заготовок при различных коэффициентах трения на верхней и нижней осадочной плите. При этом разработана и применена концепция ориентирующих карт трения («conception of friction calibration map») для определения влияния различных условий на контактных поверхностях на процесс осадки. Подобные подходы использованы для исследования бочкообразования медных цилиндрических заготовок и образцов с начальным вогнутым профилем боковой поверхности [5]. На весьма высоком уровне выполнены исследования в труде [6], в котором приведены сравнения теоретического (энергетический метод), конечно-элементного и экспериментального анализа бочкообразования заготовок при осадке.

Следует отметить, что в работах [5, 6] в качестве исходных данных для моделирования процессов осадки экспериментально определены кривые упрочнения используемых материалов заготовок. Такая необходимость обусловлена тем, что различий бочкообразования при осадке заготовок из разных материалов стальными осадочными плитами следует ожидать по нескольким причинам. Во-первых, из-за отличия коэффициентов трения на поверхности контакта материалов «сталь - медь», «сталь - алюминий», «сталь - латунь», «сталь - свинец», «сталь - сталь» и др. при заданных термомеханических условиях. Во-вторых, согласно современным представлениям [7, 8], на количественные показатели формоизменения заготовок при осадке оказывают влияние реологические свойства материалов (вид кривой упрочнения). Величина объема, образующего бочкообразную часть осаженой заготовки, является частью смещенного объема, характеризующего (по С. Финку, И.М. Павлову и др.) степень деформации заготовки в определенном направлении. В настоящее время получены данные, характеризующие бочкообразование различных материалов при различных условиях осадки [9] и разработана методика нахождения взаимосвязи между коэффициентом бочкообразности и коэффициентом контактного трения [10]. При этом, для описания закономерности изменения бочкообразности заготовок при осадке предложена универсальная экспоненциальная модель в виде выражения:

$$\lambda = a_0 \cdot \left(\frac{D_{uo}}{H_k} - \frac{D_0}{H_0} \right)^{a_1} \cdot e^{-a_2 \left(\frac{D_{uo}}{H_k} - \frac{D_0}{H_0} \right)}, \quad (4)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – коэффициенты, учитывающие свойства материала заготовки при заданных условиях деформирования, находимые, например, по результатам работ [9, 10];

$D_{uo} = D_0 \sqrt{1/(1-\varepsilon)} = 1,13 \sqrt{V_{заз} / H_k}$ – идеальный диаметр осаженой заготовки при отсутствии неравномерности деформации.

Таким образом, определены все предпосылки для расчета доли объема материала, образующего бочку, в общем балансе смещенного объема при осадке заготовок из различных материалов при различных условиях деформирования, а также с учетом условий на контактных поверхностях.

Цель работы и постановка задач исследования

Целью настоящей работы является составление баланса смещенного объема при осадке цилиндрической заготовки плоскими плитами с комплексным учетом влияния на объем бочкообразной части условий деформирования и реологических свойств материала заготовки.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Выполнить сравнение коэффициентов бочкообразности заготовок из различных материалов, осажённых при различных условиях.
2. Разработать методику расчета баланса общего смещенного объема при осадке, включая объем, образующий бочкообразную часть заготовки.
3. Рассчитать и проанализировать балансы смещенного объема и степеней деформаций, включая доли деформации, идущие на формирование бочки заготовки, объем которой зависит от условий деформирования.

Изложение основного материала

Для обобщения и сравнительного анализа бочкообразования оценивали величины показателей λ заготовок из различных материалов, но с одинаковым первоначальным отношением D_0/H_0 . Для этого использовали математическую модель (4) с коэффициентами a_0 , a_1 и a_2 , которые определяли по данным работ [9, 10] для свинца (ССу) при 18 °С, для стали Ст. 3 при температуре 1100 °С, для алюминия (АД1) при 18 °С, для алюминия (АД1) при 400 °С, для меди (М1) при 18 °С и 850 °С, для латуни (Л60) при 18 °С. Оценку проводили для заготовок с $D_0/H_0 = 0,5$ и $D_0/H_0 = 1,5$. Результаты расчетов (рис. 1) подтверждают, что заготовки с одинаковыми начальными размерами при одинаковых степенях деформации осадки, но из разных материалов и при различных температурных условиях имеют не одинаковые коэффициенты λ . Максимальная неравномерность деформации наблюдается для условий горячей осадки, причем при $D_0/H_0 = 0,5$ наибольшее бочкообразование получают стальные заготовки, а при $D_0/H_0 = 1,5$ – медные. Наименьшее бочкообразование при двух значениях D_0/H_0 наблюдается при холодной осадке алюминиевых заготовок.

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 1, и проводя сопоставление с методикой Я.М. Охрименко, очевидно, что не учет условий деформирования при расчете λ приводит к заниженным (на 24,5 % для Ст.3, на 5,9 % для АД1, на 5,1 % для М1) результатам при горячей осадке и завышенным (на 54,4 % для АД1, на 44,3 % для М1, на 30,3 % для Л60) – при холодной осадке заготовок с $D_0/H_0 = 0,5$. При осадке более низких заготовок (с $D_0/H_0 = 1,5$) имеем разницу того же порядка.

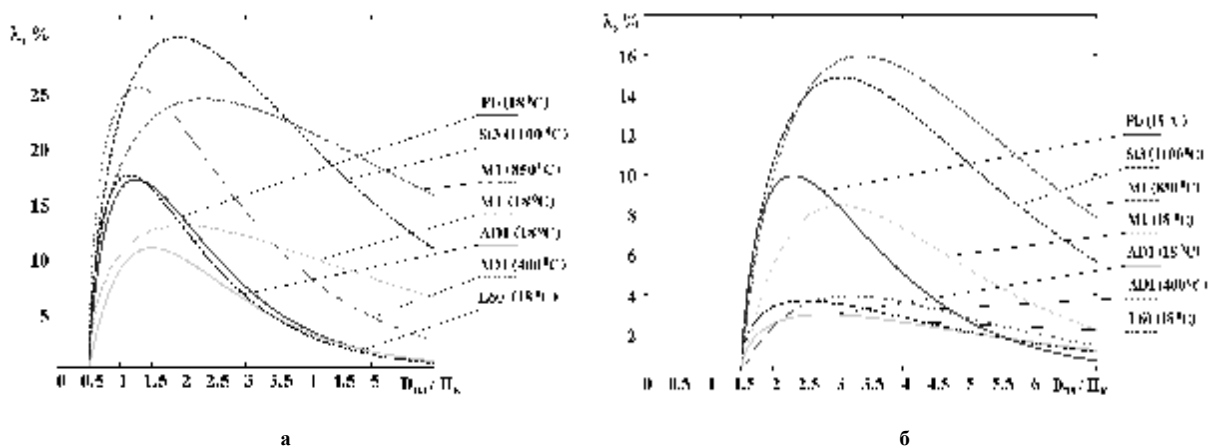


Рис. 1 – Сравнительный анализ различия коэффициентов бочкообразности при осадке заготовок из разных материалов при различных условиях:
а – $D_0/H_0 = 0,5$;
б – $D_0/H_0 = 1,5$

Следовательно, при проектировании металлосберегающих технологий, включающих расчет осадочного перехода, необходимо использование полученных уточненных данных по прогнозированию конечного формоизменения заготовок.

С учетом закономерностей бочкообразования составим баланс объемов заготовки, осаживаемой параллельными плитами. Для анализа используем схему (рис. 2), согласно которой смещенный объем $V_{см}'$ при осадке перераспределяется на объем бочки $V_б$ и объем кольцевой области V_1 , т.е.:

$$V_{см}' = \frac{\pi D_0^2}{4} (H_0 - H_k); \quad V_{см}'' = V_1 + V_б; \quad V_{см} = V_{см}' = V_{см}'' \quad (5)$$

Из формулы (1) имеем: $V_{\sigma} = (V_{заг} \cdot \lambda) / 100$. (6)

Объем кольцевой части находим как:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} (D_m^2 - D_0^2) H_k, \quad (7)$$

где $D_m = D_{уд} \sqrt{1 - 0,01\lambda}$.

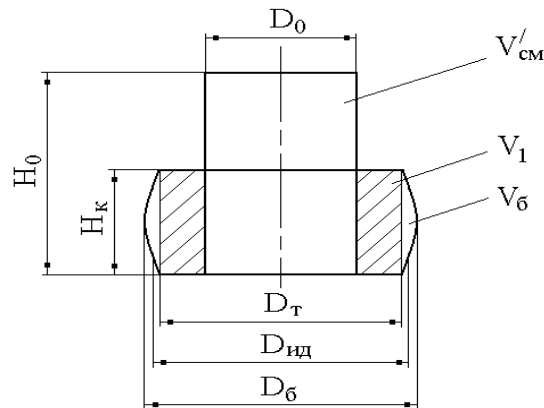


Рис. 2 – Баланс объемов заготовки при осадке плоскими плитами

Тогда запишем:

$$D_m^2 = \frac{D_0^2}{1 - \varepsilon} (1 - 0,01\lambda). \quad (8)$$

Подставляя (8) в выражение (7) и проводя преобразования, находим:

$$V_1 = V_{заг} (1 - \varepsilon) \left[\frac{1 - 0,01\lambda}{1 - \varepsilon} - 1 \right] \quad \text{или} \quad V_1 = V_{заг} (\varepsilon - 0,01\lambda). \quad (9)$$

Следовательно, степень деформации можем доказательно записать в виде суммы:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_1, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\sigma} = 0,01\lambda$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon - 0,01\lambda$.

В модель (1) входит величина текущего коэффициента контакта $D_{уд} / H_k$. Связь между ним и значением степени деформации определяется выражением:

$$\frac{D_{уд}}{H_k} = \frac{D_0}{H_0} \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon)^{3/2}}. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в модель (1) запишем расчетную формулу для нахождения коэффициента бочкообразности:

$$\lambda = a_0 \cdot \frac{D_0}{H_0} \left(\frac{1}{(1 - \varepsilon)^{3/2}} - 1 \right)^{a_1} \cdot e^{-a_2 \cdot \frac{D_0}{H_0} \left(\frac{1}{(1 - \varepsilon)^{3/2}} - 1 \right)}. \quad (12)$$

На рис. 3 приведено изменение коэффициента бочкообразности λ , рассчитанное по уравнению (12) при фиксированных $\varepsilon = 0,25$ (25 %) и $\varepsilon = 0,5$ (50 %) для различных материалов в диапазоне $D_0 / H_0 = 0,5 \dots 1,6$. Графическая зависимость $\varepsilon_{\sigma} = f(\varepsilon)$ для всех исследуемых материалов и условий деформирования при $D_0 / H_0 = 1,0$ приведена на рис. 4, а. Соответственно, функция $\varepsilon_{\sigma} = f(D_0 / H_0)$ при $\varepsilon = 0,25$ построена на рис. 4, б. Имеем качественное подобие зависимости $\varepsilon_{\sigma} = f(D_0 / H_0; \varepsilon)$ и функции $\lambda = f(D_0 / H_0; \varepsilon)$ при меньших на два порядка количественных значениях. Графическая зависимость $\varepsilon_1 = f(\varepsilon)$ свидетельствует о росте объема V_1 кольцевой части в процессе осадки заготовок. Данная функция для всех исследуемых материалов и условий деформирования при $D_0 / H_0 = 1,0$ отображена на графиках рис. 5, а. Соответственно, функция $\varepsilon_1 = f(D_0 / H_0)$ при $\varepsilon = 0,25$ построена на рис. 5, б, причем её числовые значения тем больше, чем меньше бочкообразование заготовки при осадке.

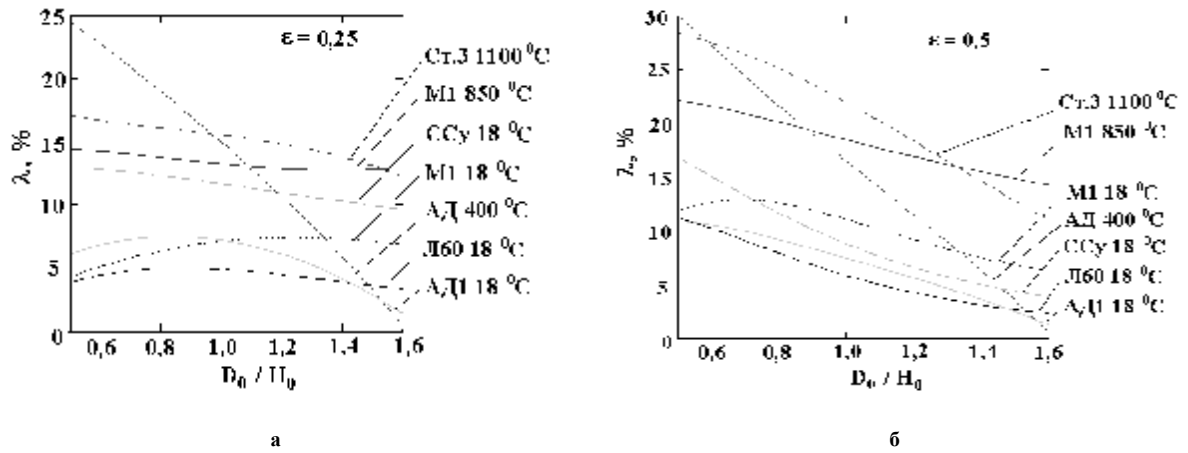


Рис. 3 – Зависимость $\lambda = f(D_0/H_0; \epsilon)$ для различных материалов:
 а – при $\epsilon = 0,25$ (25 %);
 б – при $\epsilon = 0,5$ (50 %)

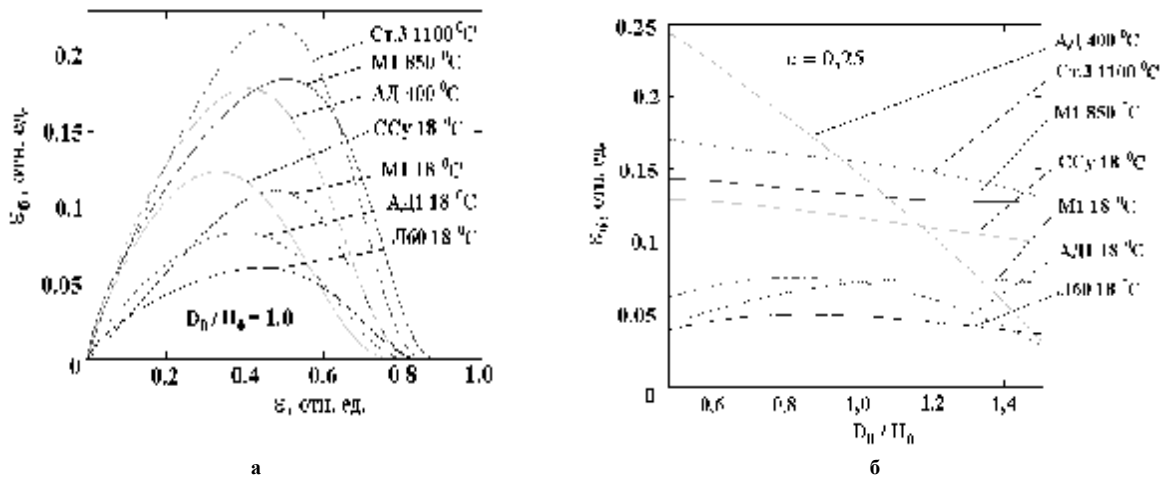


Рис. 4 – Зависимость ϵ_0 для исследуемых материалов и условий деформирования от степени деформации ϵ при $D_0/H_0 = 1,0$ (а) и от коэффициента контакта D_0/H_0 при $\epsilon = 0,25$ (б)

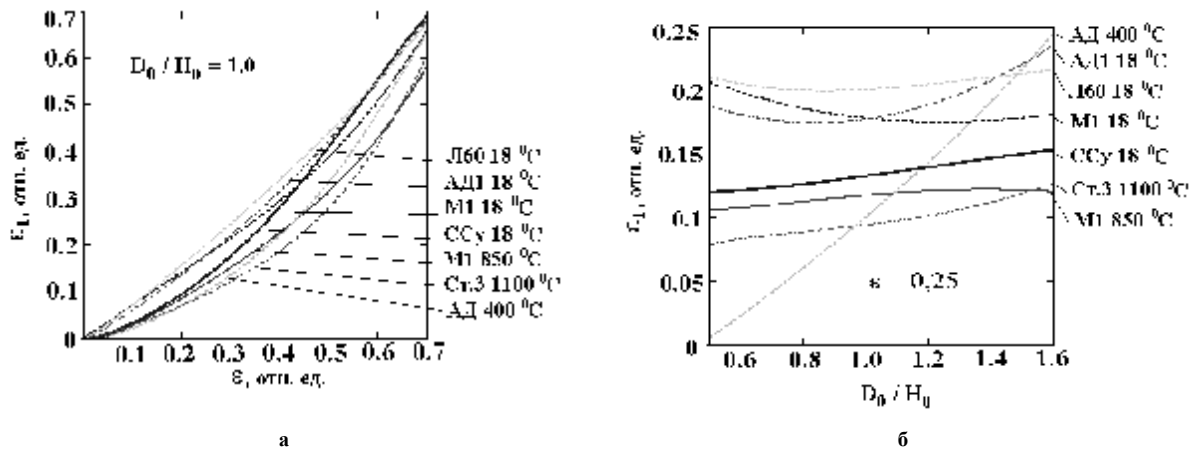


Рис. 5 – Зависимость ϵ_1 для исследуемых материалов и условий деформирования от степени деформации ϵ при $D_0/H_0 = 1,0$ (а) и от коэффициента контакта D_0/H_0 при $\epsilon = 0,25$ (б)

Таким образом, степень деформации, установленная через смещенные объемы с учетом бочкообразования, соответствует степени деформации ε , вычисляемой по разности высот заготовок при осадке. Частные степени деформации ε_{σ} и ε_1 взаимосвязаны в общем балансе объемов, который может быть выражен через общую степень деформации, определяемую выражением (10).

Выводы

Обоснована научно - практическая необходимость составления баланса смещенного объема при операции осадки цилиндрических заготовок с комплексным учетом влияния на объем бочкообразной части полуфабриката условий трибоконтактного взаимодействия и реологических свойств материала при заданных термомеханических режимах деформации.

Выявлены максимумы количественных различий коэффициентов бочкообразности заготовок одинаковых размеров, осажённых при различных условиях.

Разработана методика расчета и проанализированы балансы смещенных объемов и степеней деформации, а также установлены доли деформации, идущие на формирование бочкообразной части заготовок из различных материалов после осадки при разных условиях.

Литература

1. Воронцов А.Л. Определение формы боковой поверхности заготовки при осадке / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7-16.
2. Добров И.В. Анализ процессов трения твердых и пластически деформируемых тел в механике машин на примере осадки симметричной заготовки плоскими бойками / И.В. Добров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2009. – № 3. – С. 3-9.
3. Ajay Kumar Kaviti. Prediction of coefficient of friction for Aluminum Billet / Ajay Kumar Kaviti, Om Prakash, P. Vishwanath Kumar // Archives of Applied Research. – Scholars Research Library, 2011. – № 3 (4). – P. 328-335.
4. Malayappan S. An experimental analysis of upset forging of aluminium cylindrical billets considering the dissimilar frictional conditions at flat die surfaces / Malayappan S., Narayanasamy R. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – May, 2004 – Vol. 23, Issue 9/10. – P. 636-643.
5. Rajeev Arya. Near net shape upsetting of cooper billet using friction determination curve / Rajeev Arya, Kuldeep Singh Parihar, Pritesh Prajapati // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. – January-March, 2012. – Vol. 1, Issue II. – P. 51-54.
6. Tahir Altinbalik. An upper bound analysis and determination of the barreling profile in upsetting / Tahir Altinbalik, Yilmaz Çan // Indian Journal of Engineering & Material Sciences. – December, 2011. – Vol. 18. – P. 416-424.
7. Inverse analysis applied to the evaluation of friction and rheological parameters in hot forming of steel / 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.
8. Jerzy Kajtoch. Strain in upsetting process / Jerzy Kajtoch // Metallurgy and foundry engineering. – 2007. – Vol. 33. – № 1. – P. 51-61.
9. Кухарь В.В. Бочкообразование при осадке черных и цветных металлов и сплавов / 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.
10. Кухарь В.В. Функциональная связь неравномерности деформации с коэффициентом контактного трения при пластической осадке заготовок / В.В. Кухарь // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2009. – № 1. – С. 91-96.

Поступила в редакцию 14.01.2014

Kukhar' V.V. The balance of dismissed volume during upsetting of billet with account of conditions of deformation.

The scientific and practice necessary of count of irregularity of deformation during upsetting of billets by flat dies is grounded and influence of temperature and mechanic modes at deformation and tribo-contact condition is setting by dimension of realized barreling. Rationality of composition of balance of dismissed volume is shown at upsetting operation of cylindrical billets with complex counting of influence of deformation conditions by volume of barrel profile part of work-piece. Maximums of quantitative differences of barreling coefficients of work-pieces with same dimensions are finding after upsetting at different condition. Methodic of calculation is carrying out and balances of dismissed volumes and degrees of deformation is analyzing. Parts of deformation for barrel profile forming are finding for work-pieces from different materials after upsetting at different conditions. Showed about discounting of deformation condition during calculation of barreling coefficients of work-pieces by traditional methodic lead to errors in less of results (to 24.5 % for Steel 3, to 5.9 % for Aluminum AD1, to 5.1 % for Cooper M1) during hot upsetting and errors in up of results (to 54.5 % for Aluminum AD1, to 44.3 % for Cooper M1, to 30.3 % for Brass L60) during cold upsetting of billets with same dimensions. Basic ground about degree of deformation that find from dismissed volumes with counting of barreling is shown to correspondent of degree of deformation that calculate from difference of billets high during upsetting. Parts of degrees of deformation is correlated in common balance of volume can be express from common degree of deformation.

Key words: upsetting of billet, dismissed volume, barreling coefficient, condition on the contact surfaces, rheological properties, conditions of deformation.

References

1. Vorontsov A.L. Opredelenije formy bokovoj poverhnosti zagotovki pri osadke, Kuznechno-stampovochnoje proizvodstvo. Obrabotka materialov davlenijem, 2007, No 3, pp. 7-16.
2. Dobrov I.V. Analiz processov trenija tverdih i plasticheski deformiruyemyh tel v mehanike mashin na primere osadki simmetrichnoj zagotovki ploskimi boykami, Kuznechno-stampovochnoje proizvodstvo. Obrabotka materialov davlenijem, 2009, No 3, pp. 3-9.
3. Ajay Kumar Kaviti, Om Prakash, P. Vishwanath Kumar. Prediction of coefficient of friction for Aluminum Billet, Archives of Applied Research, Scholars Research Library, 2011. No 3 (4), pp. 328-335.
4. Malayappan S., Narayanasamy R. An experimental analysis of upset forging of aluminium cylindrical billets considering the dissimilar frictional conditions at flat die surfaces, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May, 2004, Vol. 23, Issue 9/10, pp. 636-643.
5. Rajeev Arya, Kuldip Singh Parihar, Pritesh Prajapati. Near net shape upsetting of cooper billet using friction determination curve, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, January-March, 2012, Vol. 1, Issue II, pp. 51-54.
6. Tahir Altinbalik, Yilmaz Çan. An upper bound analysis and determination of the barreling profile in upsetting, Indian Journal of Engineering & Material Sciences, December, 2011, Vol. 18, pp. 416-424.
7. Szyndler D., Pietrzyk M., Lenard J.G., Fyke S.H. Inverse analysis applied to the evaluation of friction and rheological parameters in hot forming of steel, Proc. 8th International Conference Metal Forming' 2000, Sept. 3-7.2000. Krakow; Poland, 2000, pp.101-106.
8. Jerzy Kajtoch. Strain in upsetting process, Metallurgy and foundry engineering, 2007, Vol. 33, No 1, pp. 51-61.
9. Kuhar' V.V., Lavrentik O.A., Burko V.A. Bochkoobrazovanie pri osadke chernyh i tsvetnyh metallov i splavov, Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii „Sovremennje dostizheniya v teorii i tehnologii plasticheskoy obrabotki metallov”, 26-28 sentjabrja 2007 g, Sankt-Peterburg, iz-vo SPbGPU, 2007, pp. 347-351.
10. Kuhar' V.V. Funkcional'naya svjaz' neravnomernosti deformacii s koefficientom kontaktnogo trenija pri plasticheskoy osadke zagotovok, Problemy tribologii' (Problems of Tribology), 2009, No 1, pp. 91-96.