

ВЛИЯНИЕ МАССЫ ПАДАЮЩИХ ЧАСТЕЙ МОЛОТА И МАССЫ ЗАГОТОВКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОСАДКЕ

В.Ю. Лавриненко

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса ударного деформирования заготовки при осадке с различными отношениями массы заготовки к массе падающих частей молота и различными энергиями удара. В результате обработки полученных данных на основе метода многофакторного планирования эксперимента построена математическая модель процесса ударного деформирования в виде уравнения регрессии, определяющего зависимость относительной деформации заготовки от отношения массы заготовки к массе падающих частей молота и энергии удара. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологических процессовковки на молотах.

Ключевые слова: удар, осадка, метод многофакторного планирования эксперимента, математическая модель, уравнение регрессии.

Введение

Известно, что на эффективность ударного деформирования заготовок на молоте в значительной степени влияют конструктивное исполнение молота, отношение массы шабота к массе падающих частей молота, а также вид технологической операции на молоте [1].

Однако недостаточно изучен вопрос о влиянии отношения массы заготовки к массе падающих частей молота на относительную деформацию заготовок, во многом определяющую эффективность ударного деформирования на молоте.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Осадку заготовок и определение параметров удара выполняли на экспериментальном ударном стенде, состоящем из вертикального копра и системы скоростной видеосъемки [2].

При осадке заготовки проводили видеосъемку с помощью скоростной цифровой видеокамеры FastVideo-250, во время которой данные в непрерывном режиме поступали в оперативную память компьютера.

После завершения исследуемого процесса осадки видеоизображения обрабатывали с помощью базового программного обеспечения, что позволило определить продолжительность фаз удара, деформацию заготовок и скорость движения бабы копра.

В качестве материала заготовок для моделирования горячего деформирования углеродистых и низколегированных сталей использовали прессованный свинец.

Для обеспечения условий максимального трения при горячем деформировании стали, при котором коэффициент трения близок к максимальному (0,35–0,40), поверхности заготовки и инструмента обезжиривали ацетоном и натирали мелом.

Для осадки заготовок на копре использовали две бабы массами $m_0 = 22,3; 33,45$ кг. Массы основания копра составляла 500 кг.

По данным ОАО УЗТМ, отношение массы заготовки к массе падающих частей молота для молотов с массой падающих частей 1–5 т лежит в пределах 0,01–0,06.

В связи с этим были назначены массы

заготовок-моделей $m_{\text{заг}} = 0,85$ и $1,15$ кг для осадки бабами с $m_6 = 22,3$ и $33,45$ кг. При этом отношение массы заготовки к массе бабы копра

$$K_{\text{заг}} = m_{\text{заг}} / m_6 = 0,025; 0,034; 0,038; 0,051.$$

Размеры заготовок-моделей назначали таким образом, чтобы при осадке степень деформации, приблизительно равная 10 %, соответствовала отношению высоты к диаметру заготовки $H_{\text{заг}} / D_{\text{заг}} \approx 0,3; 0,5$. Размеры заготовок составляли: $H_{\text{заг}} = 23; 26$ мм и $D_{\text{заг}} = 74; 50$ мм.

Бабу копра массой $m_6 = 22,3$ кг сбрасывали с трех различных высот: 0,5; 1,25; 2 м, а бабу массой $m_6 = 33,45$ кг – с высот: 0,33; 0,83; 1,33 м. При этом трем различным высотам сбрасывания баб соответствовали энергии удара $A = 109,3; 273,2; 473,1$ Дж.

Каждой высоте сбрасывания баб с $m_6 = 22,3$ и $33,45$ кг соответствовали три теоретические скорости движения каждой бабы в момент соударения с заготовкой: 3,13; 4,95; 6,26 м/с и 2,42; 3,96; 5,01 м/с.

При обработке полученных видеоизображений процесса осадки были определены фактические скорости движения баб копра при их падении с заданных высот, которые составляли 3; 4,8; 6 м/с и 2,4; 3,9; 5,0 м/с соответственно для баб с $m_6 = 22,3$ и $33,45$ кг. Теоретическая скорость отличается от фактической приблизительно на 5 %, что можно объяснить потерями на трение в направляющих копра.

При дальнейшей обработке видеоизображений процесса осадки получали раскадровки и определяли перемещение баб копра в процессе осадки и пластическую деформацию заготовок $\Delta H_{\text{п}}$.

При обработке полученных раскадровок процесса осадки определяли количество кадров N_1 , соответствующее нагрузочной фазе удара – от момента начала деформирования заготовки до окончания осадки заготовки, а также количество кадров N_2 , соответствующее разгрузочной фазе удара – от момента максимальной деформации заготовки до отскока от нее бабы.

Время каждой фазы удара определяли по формуле

$$T_j = N_j t \quad \text{при } j=1, 2,$$

а полное время удара – по формуле

$$T_{\text{уд}} = T_1 + T_2,$$

где N_j – количество кадров; $t = 3,33 \cdot 10^{-4}$ с – время одного кадра; T_1, T_2 – время нагрузочной и разгрузочной фаз удара.

Далее проводили масштабирование полученных кадров процесса осадки и измерение перемещения бабы ΔH_i с шагом по времени, равным принятому времени одного кадра t (рис. 1).

После определения перемещения бабы ΔH_i на каждом i -м шаге измерения вычисляли пластическую деформацию свинцовых заготовок $\Delta H_{\text{п}}$ на нагрузочной фазе удара по формуле

$$\Delta H_{\text{п}} = \Delta H_i - \Delta H_{\text{yi}},$$

где ΔH_{yi} – упругая деформация основания копра.

При обработке полученных кадров процесса осадки за перемещение ΔH_{yi} принимали величину обратного хода бабы на разгрузочной фазе удара до момента ее отрыва от заготовки.

Необходимо отметить, что свинец относится к высокопластичным материалам, поэтому упругими деформациями свинцовых заготовок пренебрегали.

На рис. 2 представлены зависимости перемещения бабы, упругой деформации основания копра и пластической деформации заготовки от времени в процессе осадки бабой с $m_6 = 22,3$ кг при $A = 109,3$ Дж. Данные зависимости были аппроксимированы полиномиальными зависимостями 4-го порядка. На рис. 2 экспериментальные значения показаны точками.

Аналогично были получены зависимости пластической деформации заготовок $\Delta H_{\text{п}}$ от времени при осадке бабами с $m_6 = 22,3$ и $33,45$ кг и других энергиях A .

Относительную пластическую деформацию заготовок определяли по формуле

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\Delta H_{\text{п}}}{H_{\text{заг}}} \cdot 100.$$

Зависимость относительной деформации заготовок ε от времени при осадке бабами с $m_6 = 22,3$ и $m_6 = 33,45$ кг; при отношениях $K_{\text{заг}} = 0,025; 0,038$ и различных энергиях A приведена на рис. 3.

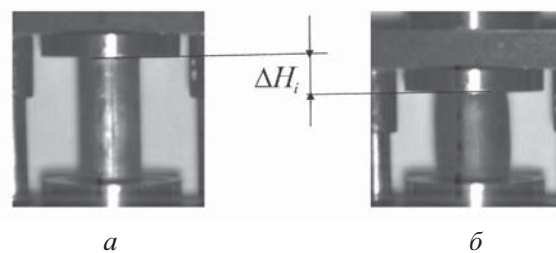


Рис. 1. Раскадровка видеоизображения для измерения перемещения бабы ΔH_i

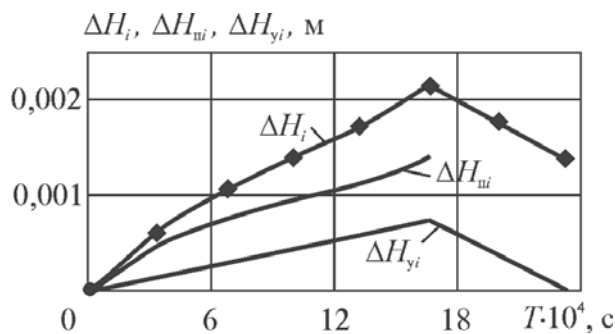


Рис. 2. Зависимости перемещения бабы ΔH_i , пластической деформации заготовок ΔH_{pi} и упругой деформации основания копра ΔH_{yi} от времени T при осадке заготовок бабой с $m_6 = 22,3$ кг при $A = 109,3$ Дж

В процессе осадки заготовок бабой с $m_6 = 22,3$ кг при $A = 109,3$ Дж получили $\varepsilon = 5,4$ %, $T_1 = 1,67$ мс; при $A = 273,2$ Дж получили $\varepsilon = 12,3$ %, $T_1 = 1,67$ мс, а при $A = 437,1$ Дж получили $\varepsilon = 18,5$ %, $T_1 = 2$ мс.

В процессе осадки заготовок бабой с $m_6 = 33,45$ кг при $A = 109,3$; $273,2$; $437,1$ Дж получили $\varepsilon = 8,1$; $16,2$; $21,9$ %, что соответственно в 1,5; 1,3; 1,2 раза больше ε при осадке бабой с $m_6 = 22,3$ кг и тех же энергиях A . При этом время нагрузочной фазы T_1 в среднем в 1,3 раза больше соответствующей величины при осадке бабой с массой $m_6 = 22,3$ кг и всех значениях энергии A .

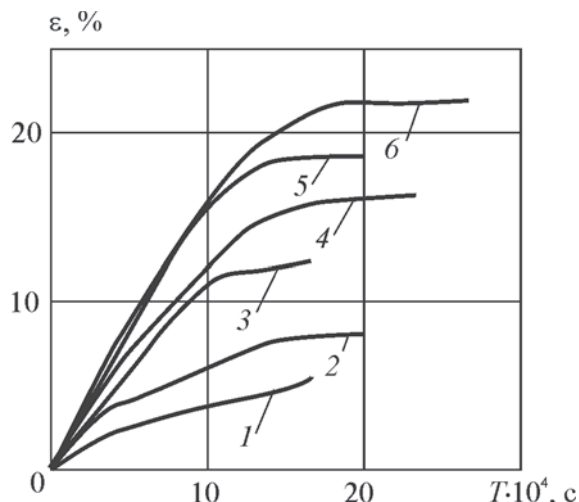


Рис. 3. Зависимости относительной деформации заготовок ε от времени T при осадке бабой с различными m_6 и A :

- 1 – при $m_6 = 22,3$ кг ($K_{заг} = 0,038$); $A = 109,3$ Дж;
- 2 – при $m_6 = 33,45$ кг ($K_{заг} = 0,025$); $A = 109,3$ Дж;
- 3 – при $m_6 = 22,3$ кг ($K_{заг} = 0,038$); $A = 273,2$ Дж;
- 4 – при $m_6 = 33,45$ кг ($K_{заг} = 0,025$); $A = 273,2$ Дж;
- 5 – при $m_6 = 22,3$ кг ($K_{заг} = 0,038$); $A = 437,1$ Дж;
- 6 – при $m_6 = 33,45$ кг ($K_{заг} = 0,025$); $A = 437,1$ Дж

Таким образом, при уменьшении отношения $K_{заг}$ в процессе осадки заготовок с одной и той же энергией удара увеличивались относительная деформация (в 1,2 – 1,5 раза) и время нагрузочной фазы T_1 (в 1,3 раза).

Математическая модель процесса ударного деформирования заготовок

Для дальнейшей обработки результатов экспериментальных исследований и построения математической модели процесса ударного деформирования заготовок использовали метод многофакторного планирования эксперимента.

Применение данного метода позволяет выявлять общие закономерности исследуемого процесса в зависимости от различных факторов, оценивать влияние этих факторов на процесс, а также проводить анализ построенных математических моделей процесса.

В качестве независимых факторов были приняты: энергия удара A и отношение $K_{заг}$. Значения факторов и уровни их варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

n	Фактор X_n	Значение фактора	Уровень варьирования
1	A , Дж	109,3	0
		273,2	1
		437,1	2
2	$K_{заг}$	0,025	0
		0,038	1
		0,051	2

Для составления матрицы плана эксперимента использовали стандартный план полного факторного эксперимента 3^2 , включающий в себя девять экспериментов.

Регрессионную модель строили в виде:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{222} X_2^3.$$

В табл. 2 представлена матрица плана эксперимента.

После обработки результатов экспериментов была проведена проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента и адекватности по критерию Фишера при принятом уровне значимости 5 %. В результате было построено уравнение регрессии, описывающее процесс удара при осадке и показывающее зависимость относительной де-

Таблица 2

Матрица плана эксперимента

Номер эксперимента	Фактор 1 (X_1)	Фактор 2 (X_2)
1	109,3	0,025
2	273,2	0,025
3	437,1	0,025
4	109,3	0,038
5	273,2	0,038
6	437,1	0,038
7	109,3	0,051
8	273,2	0,051
9	437,1	0,051

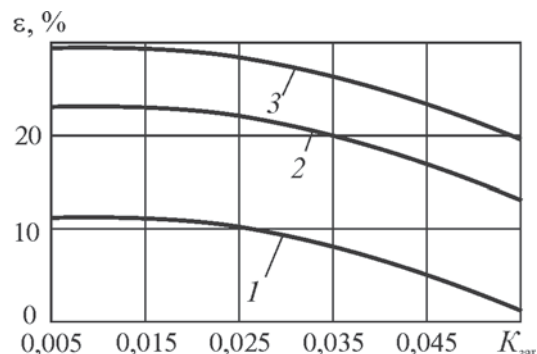


Рис. 4. Зависимость относительной деформации заготовок ε от отношения $K_{\text{заг}}$:
1 – при $A = 109,3$ Дж; 2 – при $A = 273,2$ Дж;
3 – при $A = 437,1$ Дж

формации заготовок ε от энергии A и отношения $K_{\text{заг}}$:

$$\varepsilon = 0,01 + 0,111A + 120K_{\text{заг}} - 0,0001A^2 - 5591,7K_{\text{заг}}^2 + 5926,8K_{\text{заг}}^3.$$

На рис. 4 представлены зависимости относительной деформации заготовок ε в процессе осадки от отношения $K_{\text{заг}}$ при различных энергиях A , построенные по полученному уравнению регрессии.

В результате анализа построенной регрессионной зависимости из условия $d\varepsilon / dK_{\text{заг}} = 0$ для трех различных значений энергии A было определено значение $K_{\text{заг}} \leq 0,015$, которому соответствуют наибольшая относительная деформация заготовок при осадке.

Полученные отношения $K_{\text{заг}}$ можно использовать при разработке технологических процессовковки на молотах.

Пример расчета массы падающих частей молота при осадке заготовки

Необходимо определить массу падающих частей молота при осадке заготовки диаметром $D_{\text{заг}} = 150$, высотой $H_{\text{заг}} = 100$ мм. Осадку провести до высоты поковки 80 мм. Материал заготовки – низкоуглеродистая сталь: $\sigma_{\text{в}} = 400; 20; 45$ МПа при температуре 20; 1200; 900 °С соответственно.

Объем заготовки определяли по формуле

$$V_{\text{заг}} = \frac{\pi D_{\text{заг}}^2}{4} H_{\text{заг}} = \frac{3,14 \cdot 0,15^2 \cdot 0,1}{4} = 0,00176 \text{ м}^3,$$

массу заготовки – по формуле

$$m_{\text{заг}} = \rho V_{\text{заг}} = 7,85 \cdot 10^3 \cdot 0,00176 = 13,8 \text{ кг}.$$

Из соотношения

$$K_{\text{заг}} = m_{\text{заг}} / G \leq 0,015,$$

где G – масса падающих частей молота (в кг), принимаем $K_{\text{заг}} = 0,015$ и определяем массу G :

$$G = 13,8 / 0,015 = 920 \text{ кг}.$$

По ГОСТ 9752–85 выбираем молот с ближайшей к полученной массе большей массой падающих частей $G = 1000$ кг и энергией удара $A = 25$ кДж.

Заключение

В результате экспериментальных исследований процесса ударного деформирования при осадке с различными отношениями массы заготовки к массе бабы копра $K_{\text{заг}}$ и различных энергиях A было установлено, что при уменьшении $K_{\text{заг}}$ с 0,051 до 0,025 относительная деформация заготовок увеличивается в 1,2 – 1,5 раза, а время нагрузочной фазы – в 1,3 раза при осадке заготовок с теми же энергиями удара.

После обработки результатов экспериментальных исследований с помощью метода многофакторного планирования эксперимента была построена математическая модель процесса ударного деформирования в виде уравнения регрессии, определяющего зависимость относительной деформации заготовки ε от отношения $K_{\text{заг}}$. В результате анализа построенного уравнения регрессии было установлено, что для получения наибольшей относительной деформации и повышения эффективности ударного деформирования заготовок при осадке необходимо использовать заготовки с отношением $K_{\text{заг}} \leq 0,015$. Полученные значения отношения $K_{\text{заг}}$ можно использовать при разработке технологических процессовковки на молотах.

Список литературы

1. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное производство: учебник. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 559 с.
2. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 12–15.

Материал поступил в редакцию 16.11.2011

**ЛАВРИНЕНКО
Владислав Юрьевич**

E-mail: lvq@mail.ru

Тел.: +7(499) 764-10-59

Кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологий обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО «МГИУ», заведующий межкафедральной лабораторией САПР автомобильного факультета ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – технологияковки и горячей объемной штамповки на молотах, технология холодной объемной штамповки. Автор 40 научных работ, в том числе шести патентов на изобретения и полезные модели.