

УДК 621.771

В.Ю. Лавриненко, доцент, канд. техн. наук

Московский государственный индустриальный университет
ул. Автозаводская, д. 16, г. Москва, Российская Федерация, 115280

А.Е. Феофанова, профессор, д-р техн. наук

Московский государственный технический университет «МАМИ»
ул. Б. Семёновская, д. 38, г. Москва, Российская Федерация, 107023

Е.И. Семенов, профессор, д-р техн. наук

Московский государственный индустриальный университет
ул. Автозаводская, д. 16, г. Москва, Российская Федерация, 115280
E-mail: lvq1@mail.msiu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МОЛОТАХ

Построены математические модели процесса ударного деформирования при осадке на молотах в виде уравнений регрессии, описывающих зависимость относительной деформации заготовок от размера шариков, засыпаемых в бабу молота с наполнителем, а также от отношения массы заготовки к массе бабы молота. Полученные оптимальные значения отношения массы шариков к массе бабы с наполнителем, отношения массы одного шарика к массе бабы с наполнителем; отношения массы заготовки к массе бабы молота можно использовать при разработке технологических процессов ковки на молотах.

Ключевые слова: осадка, удар, баба молота, высокоскоростная видеосъемка, уравнения регрессии.

Введение

Ковка и горячая объемная штамповка на молотах являются одними из основных способов получения высококачественных и точных заготовок (поковок) деталей различных форм и размеров, обладающих требуемыми стабильными механическими свойствами. Эффективность ударного деформирования при ковке и штамповке на молотах определяют коэффициентом полезного действия (КПД) удара, который равен отношению работы пластической деформации заготовки к энергии падающих частей молота.

Главным недостаткомковки и штамповки на молотах является низкий КПД удара вследствие кратковременности ударного деформирования заготовки, а также потерь энергии на упругую деформацию поковки и деталей молота, трение и смещение центра взаимодействующих масс. Это снижает КПД всего молота и повышает расход энергии.

В данной работе проведено построение математических моделей процесса ударного деформирования при осадке на молотах для определения оптимальных технологических параметровковки, использование которых повышает интенсивность формоизменения, КПД удара и молота.

Построение математических моделей ударного деформирования заготовок при осадке

Для построения математической модели процесса ударного деформирования заготовок при осадке бабы молота с наполнителем использованы результаты ранее проведенных экспериментальных исследований осадки заготовок на специальной ударной установке, состоящей из вертикального копра и системы скоростной видеосъемки цифровой видеокамерой [1].

Для деформирования заготовок на копре использовали стандартную бабу массой $m_{бабы} = 22,4$ кг, а также бабу с наполнителем с той же массой $m_{бабы} = 22,4$ кг. В качестве наполнителя приняты стальные шарики диаметром $D_{шар} = 1; 2; 6$ и 12 мм.

Количество шариков, засыпаемых в бабу с наполнителем, определяли отношением массы шариков к общей массе бабы $K_M = 0,15; 0,25$ и $0,35$. Для обеспечения равенства масс стандартной бабы и бабы с наполнителем при различных значениях K_M варьировали массой крышки бабы с наполнителем. Заготовки для осадки имели размеры: высота $H_{заг} = 26$ мм, диаметр $D_{заг} = 50$ мм; $H_{заг}/D_{заг} \approx 0,5$. Материал заготовок – свинец.

Стандартную бабу и бабу с наполнителем сбрасывали с трех различных высот: $0,5$ м; $1,25$ м и 2 м, которым соответствовали энергии удара $A = 100,4$ Дж; $256,9$ Дж и $401,4$ Дж.

При обработке полученных видеоизображений процесса осадки заготовок стандартной бабы и бабы с наполнителем определили продолжительности нагрузочной и разгрузочной фаз удара, полное перемещение бабы, пластическую деформацию заготовок и упругую деформацию нижнего бойка копра.

Установлено, при осадке заготовок бабой с наполнителем при всех энергиях удара происходит увеличение продолжительности нагрузочной фазы удара (до 3 раза), рост относительной деформации

заготовок (до 1,35 раза) и увеличение КПД удара (до 1,15 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой.

На основе метода многофакторного планирования построена зависимость, описывающая процесс ударного деформирования при осадке бабой молота с наполнителем. В качестве независимых факторов приняты: отношение массы одного шарика к массе бабы K_{1M} ; энергия удара; отношение массы всех шариков к массе бабы K_M . Значения выбранных факторы и интервалы их варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы экспериментов по осадке бабой с наполнителем и интервалы их варьирования

№ опыта	Фактор	Натуральное значение	Кодовое значение
1	K_{1M}	$0,2 \times 10^{-6}$	0
		$1,5 \times 10^{-6}$	1
		40×10^{-6}	2
		300×10^{-6}	3
2	A , Дж	100,4	0
		256,9	1
		401,4	2
3	K_M	0,15	0
		0,25	1
		0,35	2

Получено уравнение регрессии, описывающее процесс ударного деформирования заготовок при осадке бабой с наполнителем и показывающее зависимость относительной деформации заготовки от диаметра и массы шариков, засыпаемых в бабу, а также энергии удара:

$$\begin{aligned} \epsilon_{II} = & -8 + 71 \cdot 10^4 \cdot K_{1M} + 0,144 \cdot A + 2,156 \cdot K_M - \\ & - 19,4 \cdot 10^9 \cdot (K_{1M})^2 - 15 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 - 6,2 \cdot (K_M)^2 + 56,9 \cdot 10^{12} \cdot (K_{1M})^3. \end{aligned} \quad (1)$$

На основе уравнения (1) построены графики зависимостей относительной деформации заготовок при осадке от отношения K_M массы шариков к массе бабы с наполнителем с различными энергиями удара A и различными отношениями K_{1M} массы одного шарика к массе бабы (рисунок 1).

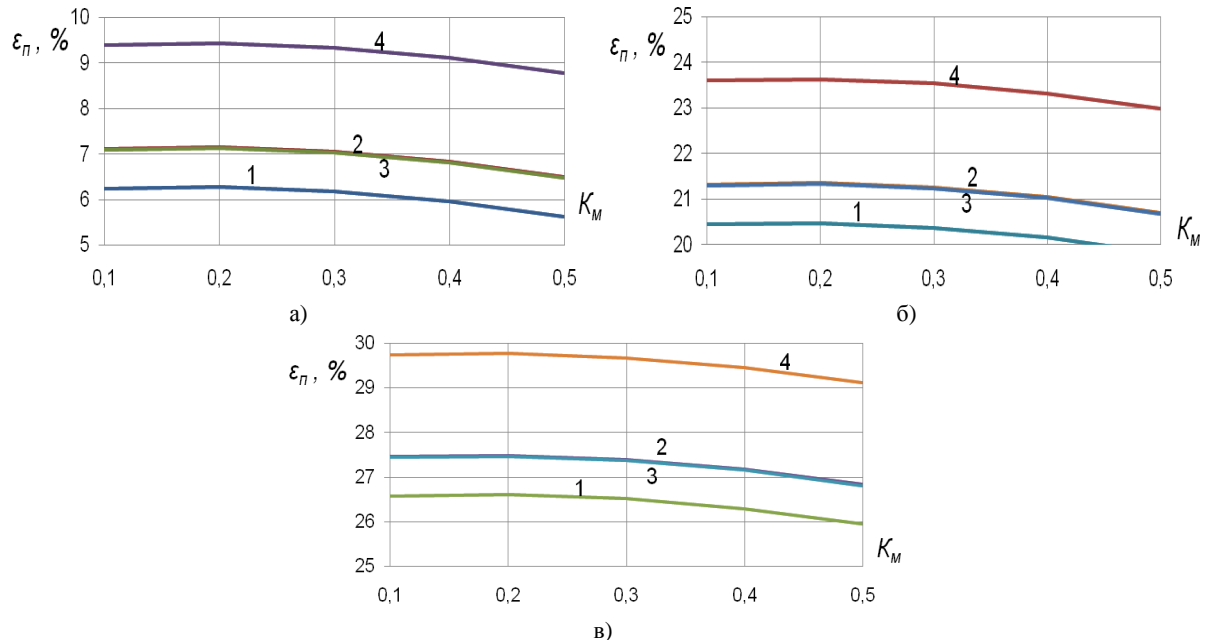


Рисунок 1 – Зависимость относительной деформации заготовок от K_M при осадке бабой с наполнителем с различными K_{1M} : а) с энергией удара $A = 100,4$ Дж; б) с энергией удара $A = 256,9$ Дж; в) с энергией удара $A = 401,4$ Дж
 1 – $K_{1M} = 0,2 \cdot 10^{-6}$; 2 – $K_{1M} = 1,5 \cdot 10^{-6}$; 3 – $K_{1M} = 40 \cdot 10^{-6}$; 4 – $K_{1M} = 300 \cdot 10^{-6}$

Для всех энергий удара при осадке (рисунок 1) с увеличением отношения K_M примерно до 0,15...0,22 относительная деформация заготовки возрастает и затем при дальнейшем увеличении K_M уменьшается.

Это позволило сделать вывод о существовании оптимальных значений параметров бабы с наполнителем K_{1M} и K_M , для нахождения которых найдены экстремумы построенного уравнения регрессии (1) из условий:

$$\frac{\partial \epsilon_{II}}{\partial K_{1M}} = 0, \quad \frac{\partial \epsilon_{II}}{\partial K_M} = 0. \quad (2)$$

Установлено, что для получения наибольшей относительной деформации заготовок при осадке необходимо использовать бабу с наполнителем со следующими параметрами:

$$K_{1M}^{OPT} = 280 \cdot 10^{-6}, \quad K_M^{OPT} = 0,17. \quad (3)$$

Кроме этого, для построения математической модели процесса ударного деформирования заготовок при осадке с различным отношением массы заготовки к массе падающих частей молота использованы результаты ранее проведенных экспериментальных исследований осадки заготовок на специальной ударной установке, состоящей из вертикального копра и системы скоростной видеосъемки цифровой видеокамерой [2].

Для деформирования свинцовых заготовок массами $m_{заг} = 0,58$ и $0,8$ кг использовали две стандартные бабы копра с $m_{бабы} = 22,4$ кг и $33,45$ кг. При этом отношение массы заготовки к массе бабы было равно $K_{заг} = 0,017; 0,024; 0,026$ и $0,036$. Заготовки для осадки имели размеры: высота $H_{заг} = 26$ и 23 мм, диаметр $D_{заг} = 50$ и 74 мм; $H_{заг}/D_{заг} \approx 0,5$ и $0,3$. Материал заготовок – свинец.

Для обеспечения равенства принятых энергий удара $A = 100,4$ Дж; $256,9$ Дж и $401,4$ Дж стандартную бабу с $m_{бабы} = 22,4$ кг сбрасывали с трех различных высот ($h = 0,5; 1,25; 2$ м), а стандартную бабу с $m_{бабы} = 33,45$ кг – с высот $h = 0,33; 0,83; 1,33$ м.

При обработке полученных видеоизображений процесса осадки заготовок двумя стандартными бабами определили продолжительности нагрузочной и разгрузочной фаз удара, полное перемещение бабы, пластическую деформацию заготовок и упругую деформацию нижнего бойка копра.

Установлено, что уменьшение отношения $K_{заг}$ от $0,026$ до $0,017$ при осадке заготовок стандартными бабами с различной массой с одинаковой энергией удара ведет к увеличению продолжительности нагрузочной фазы удара (до $1,3$ раза), увеличению степени деформации по высоте (до $1,45$) раза и увеличению КПД удара (до $1,2$ раза)

Далее с использованием метода многофакторного планирования построена зависимость, описывающая процесс ударного деформирования при осадке с различными отношениями массы заготовки к массе бабы. В качестве независимых факторов были приняты энергия удара и отношение массы заготовки к массе бабы $K_{заг}$. Значения выбранных факторы и интервалы их варьирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы экспериментов по осадке с различными отношениями массы заготовки к массе бабы и интервалы их варьирования

№ опыта	Фактор	Натуральное значение	Кодовое значение
1	A , Дж	100,4	0
		256,9	1
		401,4	2
2	$K_{заг}$	0,025	0
		0,038	1
		0,051	2

Получено уравнение регрессии, описывающее процесс ударного деформирования при осадке и показывающее зависимость относительной деформации заготовок от энергии удара и отношения массы заготовки к массе бабы:

$$\epsilon_{II} = 0,01 + 0,111 \cdot A + 120 \cdot K_{заг} - 0,0001 \cdot A^2 - 5591,7 \cdot (K_{заг})^2 + 5926,8 \cdot (K_{заг})^3. \quad (4)$$

На основе полученного уравнения (4) построены графики зависимости относительной деформации заготовок при осадке от отношения $K_{заг}$ массы заготовки к массе стандартной бабы при различных энергиях удара: $A = 100,4$ Дж; $256,9$ Дж и $401,4$ Дж (рисунок 2).

Для всех энергий удара при осадке с увеличением отношения $K_{заг}$ примерно до $0,01 \dots 0,02$ относительная деформация заготовки возрастает и затем, а при дальнейшем увеличении $K_{заг}$ относительная деформация заготовки начинает резко уменьшаться.

Это позволило сделать вывод о существовании оптимального отношения массы заготовки к массе бабы $K_{заг}$, при котором возможно получение наибольшей относительной деформации заготовок при осадке. Для определения оптимального значения $K_{заг}$ найдены экстремумы построенного уравнения регрессии (4) из условия:

$$\frac{\partial \varepsilon_{II}}{\partial K_{заг}} = 0. \quad (5)$$

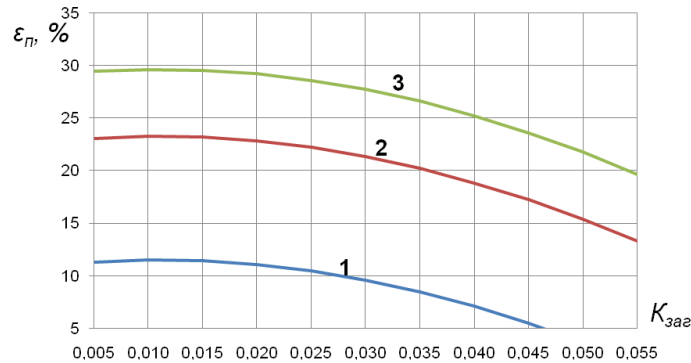


Рисунок 2 – Залежність відносної деформації заготовок при осадке від відношення маси заготовки до маси баби $K_{заг}$:

1 – с енергією удара $A = 100,4$ Дж; 2 – с енергією удара $A = 256,9$ Дж; 3 – с енергією удара $A = 401,4$ Дж

Установлено, що для отримання найбільшої відносної деформації заготовок осадку необхідно проводити з відношенням маси заготовки до маси баби

$$K_{заг}^{ОПТ} \leq 0,02. \quad (6)$$

Заключення

1. Побудовані математичні моделі процесу ударного деформування при осадке на молотах у вигляді рівнянь регресії, що описують залежність відносної деформації заготовок від розміру кульок, засипаних в бабу молота з наповнювачем, а також від відношення маси заготовки до маси баби молота.

2. Установлено, що для отримання найбільшої відносної деформації заготовок при осадке необхідно використовувати бабу з наповнювачем з відношенням маси одного шарика $K_{1M} = 280 \cdot 10^{-6}$ і відношенням маси всіх кульок до маси баби $K_M = 0,17$.

3. Також встановлено, що для отримання найбільшої відносної деформації заготовок відношення маси заготовки до маси баби повинно задовольняти умову $K_{заг} \leq 0,02$.

4. Отримані оптимальні значення відношення маси кульок до маси баби з наповнювачем, відношення маси одного шарика до маси баби з наповнювачем і відношення маси заготовки до маси баби молота можна використовувати при розробці технологічних процесів кування на молотах.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Фефанова А.Е. Експериментальні дослідження процесу удара при осадке циліндричних заготовок / А.Е. Фефанова, В.Ю. Лавриненко // Заготовительні виробництва в машинобудуванні. — 2012. — № 2. — С. 12–15.

2. Лавриненко В.Ю. Вплив маси падаючих частин молота і маси заготовки на ефективність ударного деформування заготовки при осадке / В.Ю. Лавриненко // Машинобудування і інженерне формування. — 2012. — №1. — С. 2–6.

Поступила в редакцію 13.05.2013 г.

Лавриненко В.Ю., Фефанова А.Е., Семенов Е.І. Математичні моделі процесу ударного деформування на молотах

Побудовані математичні моделі процесу ударного деформування при осадці на молотах у вигляді рівнянь регресії, що описують залежність відносної деформації заготовок від розміру кульок, що засипаються в бабу молота з наповнювачем, а також від відношення маси заготовки до маси баби молота. Отримані оптимальні значення відносин маси кульок до маси баби з наповнювачем, маси однієї кульки до маси баби з наповнювачем і маси заготовки до маси баби молота можна використовувати при розробці технологічних процесів кування на молотах.

Ключові слова: осадка, удар, баба молота, високошвидкісна відеозйомка, рівняння регресії.

Lavrinenko V.Yu., Feofanova A.E., Semenov E.I. Mathematical models of impact loading on hammers

Mathematical models of impact loading on hammers as equations of regression are developed. Optimal values of parameters of hammer ram with fillers and optimal value of ratio of blank mass and ram mass are calculated.

Keywords: upsetting, impact, ram of hammer, high-speed video camera, equation of regression.