# Експериментално и симулационно изследване на обратно изтичане в условията на обикновен и комбиниран удар

Тодор Пенчев, Ивелин Иванов, Велина Боздуганова

**Experimental and Numerical Investigation of Back Extrusion Caused by Simple and Combined Impact:** The process of back extrusion of cylindrical lead samples caused by simple and combined impact is investigated experimentally at three impact velocities of the tup in the range of 3.80 – 6.80 m/s. The dimensions of the forgings are measured. The relationships of the average height of extrusion depending on the velocity of the impact and on the specific deformation energy are determined. Numerical simulations of the experiments are carried out by means of the commercial software ABAQUS. The history of the contact force between the blank and the flying die as well as the history of the flying die displacement are obtained. The stress in the tools is analyzed as well as the effective plastic strain in the forging. The results for the bottom thickness in the simulations correspond to the experimental ones very well.

Key words: forging impact, combined impact, back extrusion, finite element simulations

## въведение

Процесът на обратно изтичане не може да се осъществи на машини с ударно действие – чукове за обемно щамповане и коване, защото тези машини нямат механизми за избутване на изковката от щампата. За получаване на детайли със сложна форма се използват чукове за високоскоростна деформация, които имат избутвачи в долната щампа [2]. Поради това с тези чукове се получават изковки с преобладаваща деформация на право или обратно изтичане [3].

Разработеният в България чук за обемно щамповане, задвижван от промишлен ракетен двигател (ПРД), дава възможност за осъществяване на операциите за пластична деформация при продължаващо действие на силата в процеса на деформиране [6]. При всички използвани досега машини с ударно действие в момента на удара няма връзка между задвижващия и изпълнителен механизъм. В резултат на това след удара се получава отскок на едната или на двете удрящи се части – обикновен удар. С използването на ПРД се осъществява нова схема на задвижване на този тип машини. При нея има непрекъсната връзка между задвижващия механизъм (ПРД) и изпълнителния механизъм на машината. При това, тази връзка не е твърда, а е регулируема в процеса на удара по отношение на големината на действащата сила. Регулирането се осъществява чрез изменение на количеството на подаваното гориво към двигателя. При използване на течно гориво (керосин) времето за въздействие е 0.001 s. Възможността за действие на сила през време на удара, която противодейства на отскока, дава основание този удар да бъде определен като "комбиниран удар" или "управляем удар". В резултат на действието на силата, приложена към деформиращия инструмент през време на ударното деформиране, се създават условия за получаване на по-голяма степен на деформация за един преход.

Изследването на процеса обратно изтичане може да се извърши и с помощта на числени методи за моделиране, като се използват съвременни програмни системи, базирани на метода на крайните елементи. Тези системи дават възможност за сравнително лесно и по-многостранно числено моделиране и изследване на процесите при ударна пластична деформация [5, 9].

Цел на настоящата работа е да се изследва експериментално и числено процесът на обратно изтичане при обикновен и комбиниран удар.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

#### 1. Използвана апаратура

За провеждане на експерименталните изследвания се използва лабораторен стенд, описан в работата [8]. За получаване на ефекта комбиниран удар се използва студен ракетен двигател, задвижван със сгъстен въздух, при налягане на въздуха до 30 bar. От управляващото устройство на стенда може да се зададат четири режима на работа – фиг. 1.



Фиг. 1. Режими на удара:

1 – свободно падане (с изключен двигател) и притискане в процеса на удар (включване на ракетния двигател в момента на удара); 2 – ускоряване с ракетен двигател в процеса на падане и изключване на двигателя в момента на удара; 3 – включен ракетен двигател през време на падане и на удара; 4 – обикновен удар (ракетният двигател е изключен през цялото време).

#### 2. Методика на експериментите

## 2.1. Материал на заготовките

Заготовките се изработват от олово с чистота 99.99 %. Те са цилиндрични, с диаметър  $D_o = 20$  mm и височина  $H_o = 20$  mm. Изработват се чрез отливане, следващо изковаване на студено и струговане.

#### 2.2. Последователност на работа

Използва се класическата технология за получаване на кух цилиндричен детайл от цилиндрична заготовка. Бойникът пада от височина 0.756, 1.62, 1.85, 2.33 m като измерената скорост на удара е 3.85, 5.64, 6.03 и 6.76 m/s. Измерват се максималната  $H_{max}$  и минимална  $H_{min}$  височина на стената на изковката, получена при деформирането на цилиндричната заготовка, след което се пресмята средната височина  $H = (H_{max} + H_{min})/2$  и разликата  $\Delta H = H_{max} - H_{min}$ . За получаване на ефекта комбиниран удар, през време на удара заготовката се притиска със сила 215.8 N, която се получава при продължаваща работа на ракетния двигател.

Параметрите, които се изследват, са: височината *H* на изтеклия материал и специфичната енергия на удара *E*<sub>c</sub>. Последната се пресмята по формулата:

$$E_{c} = \frac{E_{\gamma}}{Q}, \qquad (1)$$

където  $E_v$  е енергията на удара, J, а Q – обемът на заготовката, cm<sup>3</sup>.

### ЧИСЛЕНИ СИМУЛАЦИИ

Извършени са числени симулации на динамичния процес на обратно изтичане с помощта на комерсиалната програмна система по метода на крайните елементи ABAQUS™ v6.11 на Dessault Systèmes SIMULIA® Corp. [4] при описаните в експериментите условия. Използван е метод за изследване на преходни процеси с явно интегриране по времето (модул Explicit). Предполага се Кулоново триене по контактните повърхнини с коефициент на триене *μ* = 0.03. Тази стойност е уточнена след числени симулации с различни стойности на *μ* и сравняване на получените резултати с експерименталните.

Бойникът е приет за идеално твърдо тяло, а поансонът и матрицата са моделирани като деформируеми тела с пространствени 10-възлови четиристенни крайни елементи. Образецът е моделиран с пространствени шестстенни 8-възлови Ойлерови крайни елементи с редуцирано интегриране. Предимство на Ойлеровите крайни елементи е, че мрежата не се деформира, а материалът се движи в нея. Прието е, че при пластична деформация материалът е несвиваем и е избран коефициент на Поасон *v* = 0.47.

Материалът на образеца е еластично-пластичен със степенно уякчаване [7]

$$\sigma = E_{\varepsilon_{\theta}} \le \sigma_{y},$$

$$\sigma_{y} = (A + B_{\varepsilon_{p}}^{n}),$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{p}.$$
(2)

В тези зависимости  $\sigma_y$  е граница на провлачване,  $\varepsilon_e$  – еластична деформация,  $\varepsilon_p$  – пластична деформация, E – модул на еластичност на линейните деформации, A – начална граница на провлачване, B и n – константи на степенното уякчаване. В [1] са определени осреднените числени стойности за параметрите на модела на материала: A = 6 MPa, B = 37.756 MPa, n = 0.28014.

#### РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ И СИМУЛАЦИИТЕ

На фиг. 2 са показани получените чрез ударно обратно изтичане образци. След измерване на размерите *H<sub>max</sub>* и *H<sub>min</sub>*, се пресмятат *H* и *E<sub>c</sub>*. С получените стойности са построени зависимостите, показани на фиг. 3.



Фиг. 2. Образци от олово след деформиране чрез обратно изтичане при различни режими и енергии на удара

От фиг. 3 следва, че влиянието на допълнителната притискаща сила върху средната височина на изтичане на материала е по-голямо при по-големите начални скорости на удара (и при по-големите специфични енергии на удара).

На фиг. 4 е показано полученото при числените симулации изменение на контактната сила *F* между заготовката и поансона и на преместването *u* на челото на поансона в зависимост от времето за двата случая - обикновен (фиг. 4 а) и комбиниран удар (фиг. 4 б) при три от изследваните скорости.



Фиг. 3. Експериментални зависимости при ударно обратно изтичане: а) средна височина на изтичане *H* от началната скорост на удара *V<sub>y</sub>*; б) средна височина на изтичане *H* от специфичната енергия на удара *E<sub>c</sub>* 

Вижда се, че при комбинирания удар контактната сила между заготовката и поансона и преместването на челото на поансона стават малко по-големи от съответните при обикновения удар, тъй като допълнително приложената сила е относително малка (тя е около 1 % от средната стойност на контактната сила).



Фиг. 4. Изменение на контактната сила *F* заготовка-поансон и на преместването *u* на челото на поансона при обикновен (а) и комбиниран (б) удар

Резултатите за дебелината на дъното на изковката, получени от експериментите  $h_e$  и симулациите h при ударно обратно изтичане, са представени в табл. 1. Изчисляването на h се извършва по формулата  $h = H_0 - u_{max}$ , където  $u_{max}$  е максималното преместване на челото на поансона. Вижда се, че с използвания за числените симулации модел се получава достатъчно добро съответствие с експерименталните данни. Най-голямото отклонение за h е при най-голямата скорост за комбинирания удар и има стойност 5.27%. докато при най-малката скорост е 0.23%.

Резултати от симулациите и експеримента при ударно обратно изтичане Таблица 1.

	V(m/s)	h <sub>e</sub> (mm)	<i>h</i> (mm)	( <i>h</i> – <i>h<sub>e</sub></i> )/ <i>h<sub>e</sub></i> .100 (%)
Обикновен удар	3.85	17.40	17.44	0.23
	5.64	15.75	15.75	0
	6.03	15.00	15.44	2.93
	6.76	13.95	14.41	3.30
Комбиниран удар	3.85	17.40	17.44	0.23
	5.57	15.40	15.77	2.40
	6.24	14.30	15.04	5.17
	6.76	13.65	14.37	5.27

Разпределението на остатъчните пластични деформации в изковката за случаите на обикновен и комбиниран удар при скорост 5.64 m/s е показано съответно на фиг. 5 а и б.







В края на деформационния процес са получени разпределенията на еквивалентните напрежения на фон Мизес в изковката за случаите на обикновен (фиг. 6 а) и комбиниран удар (фиг. 6 б). На фиг. 7 са онагледени разпределенията на максималните за процеса еквивалентни напрежения на фон Мизес в инструментите (поансон и матрица) за случая на комбиниран удар.



Фиг. 6. Остатъчни напрежения на фон Мизес при обикновен (а) и комбиниран (б)



Фиг. 7. Максимални напрежения на фон Мизес в поансона (а) и в матрицата (б)

#### изводи

От експерименталните резултати следва, че влиянието на допълнителната притискаща сила върху средната височина на изтичане на материала е по-голямо при по-големите начални скорости на удара (и при по-големите специфични енергии на удара).

Числените симулации показват, че при комбинирания удар контактната сила между заготовката и поансона и преместването на челото на поансона нарастват незначително в сравнение с обикновения удар. Ефектът от прилагане на допълнителна сила при комбинирания удар е относително малък, тъй като тази сила е около 1 % от средната стойност на контактната сила.

Остатъчните деформации са максимални в ъгловите точки, където потокът на пластично течене сменя посоката си. Там се намират и максималните остатъчни напрежения на фон Мизес.

Използваният за числените симулации модел дава резултати за дебелината на дъното на изковката (и за средната височина на стените й), близки до експерименталните.

#### Благодарности

Представените изследвания в настоящата работа са осъществени с финансовата подкрепа на Фонд "Научни изследвания", договор Д0 02-262/2008.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов И. и др. Експериментално и симулационно изследване на нискоскоростна пластична деформация при сплескване. Механика на машините, Т. 20 (98), № 3, 86-89, 2012.

[2] Согришин Ю.П., Гришин Л.Г., Воробьев В.М., Штамповка на высокоскоростных молотах, М., Машиностроение, 1978, 166 с.

[3] Согришин Ю.П., Состояние, проблемы и перспективы развития скоростной штамповки, Кузнечно-штамповочное производство, 1081, 1, 18-19.

[4] ABAQUS<sup>™</sup> v6.11, Dessault Systèmes SIMULIA® Corp., 2011.

[5] Belytchko T. et al. Nonlinear finite elements for continua and structures. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

[6] Bodurov P., T. Penchev, Industrial rocket engine and its application for propelling of forging hammers, Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161, 504-508.

[7] Malvern L. E. Introduction to the mechanics of a continuous medium. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1969.

[8] Penchev T., Altaparmakov I., Karastojanov D., Experimental study on the possibilities to decrease the coefficient of restitution after impact, 2012 International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, August 16-18, 2012,

Tajuan, China.

[9] Rojek J. et al. Advances in FE explicit formulation for simulation of metal forming processes, J. of materials processing technology, 119, (2001), 41-47.

#### За контакти:

Доц. д-р Тодор Пенчев, Катедра "Материалознание и технология на материалите", Технически университет – София, e-mail: <u>tpenchev@tu-sofia.bg</u>

Доц. д-р инж. Ивелин Иванов, Катедра "Техническа механика", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 472, e-mail: <u>ivivanov@uni-ruse.bg</u>

Д-р инж. Велина Боздуганова, Катедра "Техническа механика", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 572, e-mail: <u>velina@uni-ruse.bg</u>

#### Докладът е рецензиран