

Сравнение на числени симулации на ударно пластично деформиране

Велина Боздуганова, Ивелин Иванов

Comparison of Numerical Simulations of Plastic Deformations by Impact. Numerical simulations of lead samples in impact upsetting as well as in back extrusion have been done. The implemented methods of ABAQUS commercial Finite Element (FE) code are used: explicit Lagrangian FEs, adaptive mesh on Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method, Combined Eulerian-Lagrangian (CEL) method, and Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) method. The plastic behavior of the material is described by the model of Johnson-Cook (the dependences on the strain rate and on the temperature are not included). The contact force history of the tip and its displacement history in the simulations are compared with those in the experiments which are carried out. The comparison between the methods gives us conclusions about their features and capabilities which can help us for the right choice of such a method.

Key words: impact, plastic deformation, upsetting, extrusion, finite element method

ВЪВЕДЕНИЕ

Коването е динамичен процес на пластично деформиране, при който заготовката е подложена на ударно натоварване. За постигането на желаните форма и размери на изковката, е необходимо да се разполага с достатъчно точен модел на процеса. Моделирането може да се извърши на базата на физически експерименти, чрез аналитични зависимости или като се използват числени методи.

Физическите експерименти отчитат реалните характеристики на явлението и са необходими и полезни, но са свързани с големи разходи на материал и средства, изискват скъпа апаратура, а често резултатите съдържат нежелани странични ефекти.

Аналитичните методи за изследване обикновено са приложими за тела със сравнително проста форма, а реалните детайли в повечето случаи имат твърде сложна конфигурация.

Използването на числени методи за моделиране на процеса коване позволява да се изследват изковки със сложна форма. Съвременните програмни системи, базирани на метода на крайните елементи, разполагат с различни начини за моделиране и симулации на големи пластични деформации при удар.

Целта на това изследване е подходящ избор и съпоставяне на числени симулации по различни методи.

МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Извършени са числени симулации на процеса на ударно сплескване на цилиндрични оловни образци с помощта на комерсиалната програмна система по метода на крайните елементи ABAQUS™ v6.11 на Dessault Systèmes SIMULIA® Corp. Използвани са всички възможни методи на програмната система. Симулациите са сравнени с проведени експерименти за ударно сплескване на цилиндрични оловни образци с изпитвателна машина Instron Dynatup® 9200 при начална скорост на бойника 4.8 m/s, при които е измерена и записана действащата върху бойника сила. Скоростта в началото на удара се отчита чрез индуктивен датчик. Предполага се Кулоново триене по контактните повърхнини с коефициент на триене 0.5.

За да се оцени възможността за прилагане на различните числени методи при изследване на технологични процеси с големи пластични деформации и запълване на форми, числено е симулиран процес на обратно течене (екструзия). Началната скорост на бойника е 6 m/s, използвани са същите методи и са съпоставени резултатите от отделните симулации.

В комерсиалната програма ABAQUS v6.11 [2] са включени следните методи с явно интегриране по времето (модул Explicit):

Lagr – с Лагранжеви крайни елементи (КЕ) с пълно и редуцирано интегриране;
 ALE – с адаптивна Лагранжева мрежа и Ойлерови стъпки за изправяне на мрежата;
 CEL – комбинирани Лагранжеви и Ойлерови КЕ;
 SPH – безмрежов Лагранжев метод.

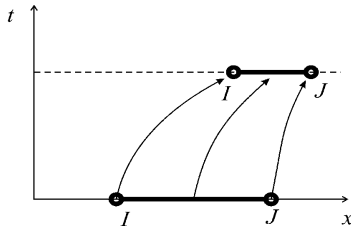
Всички те са използвани за изследване на сплескването и обратното течене.

ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ

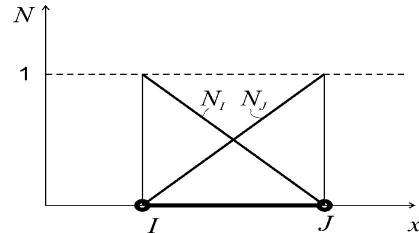
Процесът на динамично деформиране на непрекъснатата среда може да се опише, като се използва законът за изменение на количеството на движение за елементарен обем [3, 7]

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + b_i \rho, \quad (1)$$

където ρ е обемната плътност на средата, \ddot{u}_i ($i = 1, 2, 3$) – i -та компонента на ускорението, $\sigma_{ij,j}$ – производна по j -тата координата ($j = 1, 2, 3$) на компонентата на напрежението σ_{ij} , b_i – i -та компонента на обемната сила за единица маса.



Фиг. 1. Лагранжев краен елемент



Фиг. 2. Функции на формата на Лагранжев краен елемент

Апроксимацията на вектора на преместванията u в уравненията (1) с Лагранжеви крайни елементи, които се деформират и движат заедно с материала, като запазват масата си (фиг. 1), се основава на функциите на формата N_i (фиг. 2)

$$u = \sum_I N_I \hat{u}_I, \quad (2)$$

където \hat{u}_I са векторите на възловите премествания [3].

След дискретизацията на уравнения (1) и използване на конститутивните уравнения и формулите на Коши

$$\sigma_{ij} = \Phi(\varepsilon_{ij}), \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

се получава матрично записаната система от обикновени диференциални уравнения

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{f}^{\text{ext}} - \mathbf{f}^{\text{int}}, \quad (4)$$

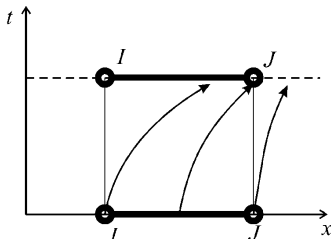
където \mathbf{M} е масовата матрица, $\ddot{\mathbf{u}}$ – вектор на възловите ускорения, а \mathbf{f}^{ext} и \mathbf{f}^{int} – векторите на външните и вътрешни възлови сили.

Явното интегриране на (4) по времето е устойчиво само при условие, че стъпката по времето Δt удовлетворява условието

$$\Delta t \leq \min\left(\frac{h}{c}\right), \quad (5)$$

където h е разстояние между възлите, а c е скоростта на звука в непрекъснатата среда.

Предимствата на Лагранжевите елементи е, че водят до ефективни изчисления и точни резултати. Основен недостатък е, че деформирането на крайните елементи може да достигне такава степен, че изчислителният процес да се прекъсне поради невъзможност от точно интегриране.



Фиг. 3. Ойлеров краен елемент

Когато за дискретизация на уравненията (1) се използват Ойлерови елементи, които са неподвижни, а материалът се движи през тях (фиг. 3), преместванията се апроксимират както при Лагранжевия метод и се получава матрично записаната система от обикновени диференциални уравнения спрямо скоростта \mathbf{v}

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{L}\mathbf{v} = \mathbf{f}^{\text{ext}} - \mathbf{f}^{\text{int}}, \quad (6)$$

където \mathbf{L} е конвективна матрица. В този случай трябва да се изпълни и законът за запазване на масата на непрекъснатата среда

$$\dot{\rho} + \rho v_{i,j} = 0, \quad (7)$$

който след дискретизацията добива вида

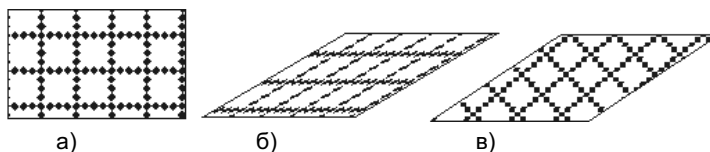
$$\mathbf{M}^{\rho}\dot{\boldsymbol{\rho}} + \mathbf{L}^{\rho}\boldsymbol{\rho} + \mathbf{K}^{\rho}\boldsymbol{\rho} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Тук матриците \mathbf{M}^{ρ} , \mathbf{L}^{ρ} , \mathbf{K}^{ρ} са съответно капацитивна, транспортна и дивергенционна.

Предимство на Ойлеровите крайни елементи е, че мрежата не се деформира, а материалът се движи. Недостатък на тези елементи е увеличеният брой изчисления.

Възможно е да се състави модел CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) [2], в който да се комбинират и да си взаимодействат Ойлеровите и Лагранжевите елементи, всеки със своите предимства и недостатъци.

Методът ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [4] е метод за адаптивно изменение на изходната Лагранжева мрежа (фиг. 4а). Когато след няколко стъпки на числено интегриране по времето първоначалната Лагранжева мрежа се изкриви достатъчно (фиг. 4б), се генерира в границите на деформираното тяло нова (изправена) мрежа от елементи (фиг. 4в), за която е необходимо да се направи Ойлерова стъпка за отчитане на преминаването на материала през нея.



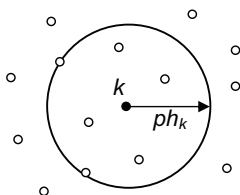
Фиг. 4. Метод ALE: а) първоначална Лагранжева мрежа; б) деформирана Лагранжева мрежа; в) нова (изправена) мрежа;

Предимствата на метода ALE се заключават в ефективност на изчисленията и избягване на намаляването на стъпката по времето поради скъсяване на междувъзловото разстояние. Недостатък е, че при сложно по геометрия изкривяване на границите на деформираното тяло алгоритмите за регенериране на изправена мрежа може да са безпомощни.

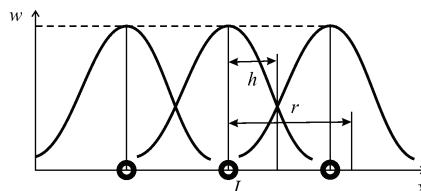
Последният използван метод е методът на изгладените хидродинамични частици SPH (Smoothed particle hydrodynamics) [5]. Той е Лагранжев, но безмрежов, т.е. всеки възел е и елемент, в който се определят вътрешните сили (фиг. 5). Апроксимацията на преместванията става с изглаждаща функция w (фиг. 6) със свойството $\int_{\Omega} w d\Omega = 1$ и има вида

$$u = \sum_{k=1}^n m_k \frac{\hat{u}_k}{\rho_k} w(x, h), \quad (9)$$

където n е броят на съседните възли, h – характеристична дължина, r – радиус на влияние. Изглаждащата функция в ABAQUS е кубичен сплайн.



Фиг. 5. Безмрежов метод SPH



Фиг. 6. Изглаждащи функции за метода SPH

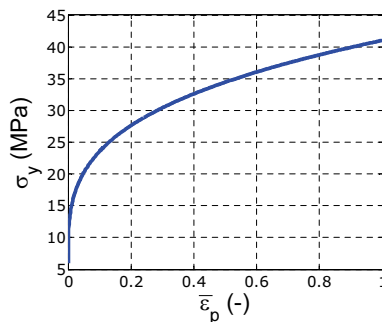
Предимство на метода SPH е, че не е необходима мрежа, което улеснява прилагането му. Слабости на метода са: извършване на повече изчисления поради прекриването на областите на влияние на съседните възли и необходимостта от използване на алгоритъм за търсенето им; неточен е пак поради прекриването при интегрирането; неустойчив е при опънови напрежения, което води до разкъсване на непрекъснатата среда.

МОДЕЛ НА МАТЕРИАЛА

Изследваният процес на ударно сплескване на оловен образец се осъществява от механична система, състояща се от бойник и наковалня. Бойникът и наковалнята са приети за идеално твърди, а материалът на образца е еластично-пластичен, описан с модела на Джонсън-Кук [6] (без отчитане на скоростта на деформиране и температурата)

$$\sigma_y = A + B \bar{\varepsilon}_p^n, \quad (10)$$

където σ_y е граница на провлачване, $\bar{\varepsilon}_p$ – ефективна пластична деформация, A , B , n – характеристики на материала. На фиг. 7 е показана графиката на зависимостта (10) при $A = 6$ МПа, $B = 38$ МПа, $n = 0.28$, получени от проведени експерименти при квази-статично сплескване на цилиндричен оловен образец [1].



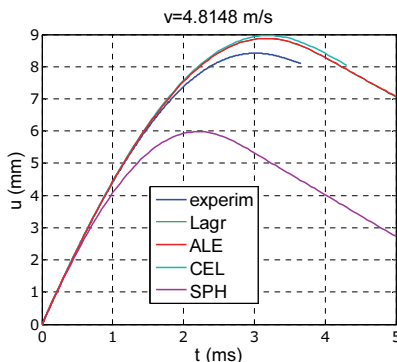
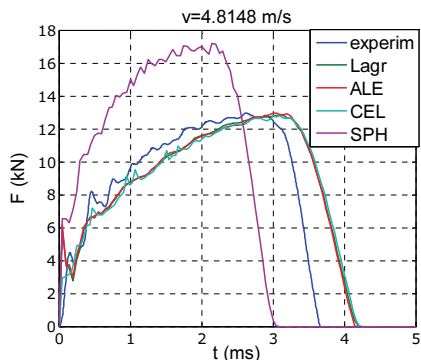
Фиг. 7. Модел на използвания материал

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

При числените симулации на ударното сплескване и на обратното течене, поради симетрията, е използвана само четвъртинка от образца.

1. Ударно сплескване

На фиг. 8 е показано изменението във времето на контактната сила върху бойника при деформиране на образца, получено по различните числени симулации и от експеримента. От зависимостите следва, че всички методи, с изключение на безрежовия (SPH), дават резултати, близки до експерименталните.



Фиг. 8. Изменение на контактната сила върху бойника във времето (при сплескване)

Фиг. 9. Изменение на скъсяването на образца във времето (при сплескване)

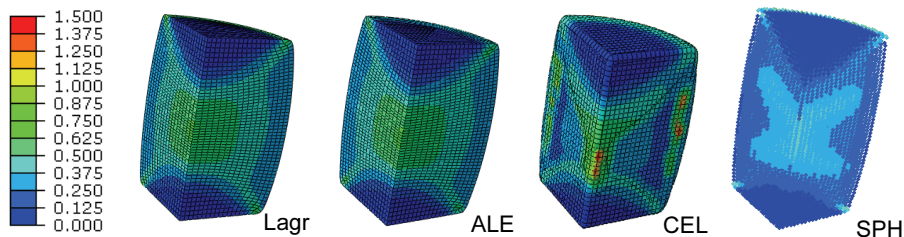
Подобни са резултатите и за изменението на скъсяването на образца във времето (фиг. 9).

В таблица 1 са записани стойностите на получените от симулациите и от експеримента максимална скорост на отскачане V_{max} , максимално скъсяване на образца u_{max} и времето за това скъсяване t^* . Разликата между стойностите на V_{max} при симулациите и експеримента се дължи на липсата на гравитация в симулациите.

Таблица 1. Резултати от симулациите при сплескване

Метод	V_{max} (m/s)	u_{max} (mm)	t^* (ms)
Lagr	1.2315	8.8747	3.0151
ALE	1.2134	8.8774	3.0151
CEL	1.2269	8.9660	3.1822
SPH	1.2962	5.9833	2.2001
experim	0.7712	8.4174	3.0151

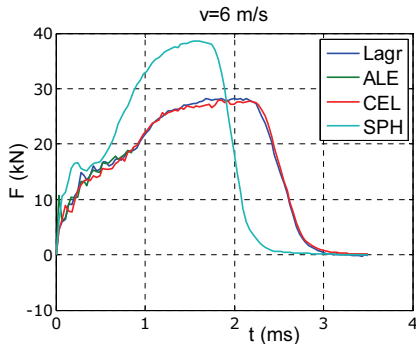
От сравняването на остатъчните пластични деформации следва, че и те са близки за всички случаи, освен за безрежовия метод SPH.



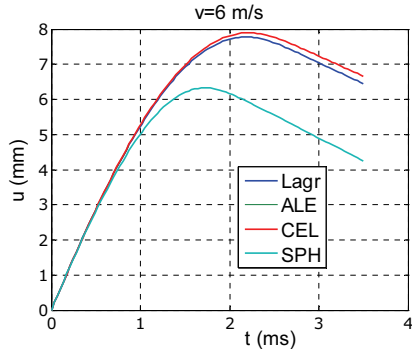
Фиг. 10. Остатъчни пластични деформации при сплескване

2. Обратно течение (екструзия)

При симулациите на процеса на обратна екструзия с числения метод ALE, поради голямото изкривяване на границите на областа, изчисленията прекъсват в момента 0.875 ms от началото на изпълнението на задачата. Методите Lagr и CEL дават почти еднакви резултати и за контактната сила (фиг. 11), и за преместването на бойника (фиг. 12), но при първия метод има голямо изкривяване на елементите, което се вижда от фиг. 13.



Фиг. 11. Изменение на контактната сила върху бойника във времето (при екструзия)



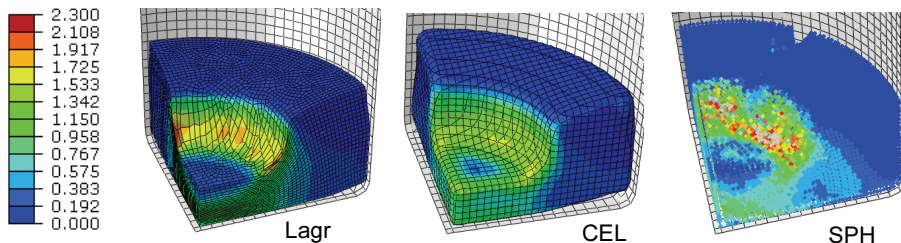
Фиг. 12. Изменение на скъсяването на образеца във времето (при екструзия)

Таблица 2 отразява получените резултати за максималната скорост на отскачане V_{max} , максималното преместване на бойника u_{max} и времето за това преместване t^* при обратно течение.

Таблица 2. Резултати от симулациите при екструзия

Метод	V_{max} (m/s)	u_{max} (mm)	t^* (ms)
Lagr	1.1981	7.7729	2.1701
CEL	1.1495	7.8984	2.2054
SPH	1.3047	6.3279	1.7151

За остатъчните пластични деформации методите Lagr и CEL дават близки резултати, но при метода Lagr се появява концентрация на напреженията, дължаща се на голямото локално изкривяване на мрежата. При безмрежовия метод (SPH) се наблюдава разкъсване на непрекъснатата среда.



Фиг. 13. Остатъчни пластични деформации при екструзия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените изследвания дават възможност да се формулират следните изводи:

1. При малки формоизменения Лагранжевият метод (Lagr) и неговите подобрения с адаптивна Лагранжево-Ойлерова мрежа (ALE) са ефективни и дават надеждни резултати в елементите.
2. При големи формоизменения Лагранжевите методи, дори с адаптивна Лагранжево-Ойлерова мрежа (ALE), или не дават резултати, или получените резултати не са надеждни поради голямото изкривяване на мрежата. В такива случаи най-надежден и успешен е Ойлеровият метод в комбинация с Лагранжевия (CEL).
3. Методът на изгладените хидродинамични частици (SPH), реализиран в последната версия на ABAQUS, е твърде неточен за изследване на големи пластични деформации и освен това е неустойчив при сложни формоизменения като обратното течение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов И. и др. Експериментално и крайно-елементно изследване на ниско-скоростна пластична деформация при сплескване. Механика на машините (под печат).

[2] ABAQUS™ v6.11, Dassault Systèmes SIMULIA® Corp., 2011.

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

[4] Donea J. et al. Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods. Encyclopedia of Computational Mechanics. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

[5] Idelsohn S. R. et al. The meshless finite element method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 58, 893-912, 2003.

[6] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International symposium on ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983.

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

За контакти:

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

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

Докладът е рецензиран