ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИЧНИТЕ И МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА МАТЕРИАЛИТЕ И ТЕМПЕРАТУРАТА ПРИ ФОРМИРАНЕ НА КУМУЛАТИВНА СТРУЯ

ПЕТКО ПЕТКОВ

*Институт по металознание, съоръжения и технологии
с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. А. Балевски“,
Българска академия на науките,
бул. „Шипченски проход“ № 67, 1574 София, България,
e-mail: petko_st_petkov@abv.bg*

Резюме. Проектирането на кумулативен заряд с предварително зададени характеристики на кумулативната струя е сложна инженерна задача, която изисква отчитането и балансирането на факторите, влияещи върху формирането на кумулативната струя. Изследвани са влиянието на напреженията и температурните изменения, възникващи в материала на кумулативната облицовка на различни разстояния от върха ѝ. На базата на предложен от автора подход за решаването на тази задача е извършено числено симулиране, позволяващо по-задълбочено анализиране на процесите, протичащи при високоскоростното деформиране на кумулативната облицовка и формирането на кумулативната струя.

Ключови думи: кумулативен заряд, кумулативна струя, кумулативна облицовка, механични свойства, температура.

1. УВОД

Проектирането на кумулативни заряди със специална форма и предназначение, т.е. формиращи кумулативна струя с предварително определени характеристики, изисква непрекъснато усъвършенстване на използваните подходи и методики. За постигането на тези характеристики, в процеса на проектиране, е необходимо отчитането на все повече фактори, влияещи върху процесите на образуване и движение на кумулативната струя.

Кумулативните заряди се състоят от взривно вещество с детонатор в единия и кухня в другия край, която обикновено има формата на конус, облицован с конусен детайл, изработен от мед, стомана, алуминий или друг материал. След взривяване на детонатора възниква детонационна

DOI: 10.7546/EngSci.LVI.19.04.02

вълна, която, разпространявайки се към задната образуваща на конуса, предизвиква свиване на стените на облицовката една към друга и сблъсък между тях, при което налягането в материала рязко нараства и формира кумулативна струя. Параметрите и характеристиките, а оттам и пробивната способност на струята, силно зависят от симетрията на процеса, която от своя страна се обуславя от редица фактори.

Проектирането и оптимизацията на кумулативен заряд с определени характеристики включва не само определянето на геометрията на детайлите, но и избор на материали, методи за изработване, технология на монтаж и напълване, текущ и окончателен контрол и др. [1–5]. Предвид влиянието на изброените и на редица други фактори – включително физико-механичните характеристики на материалите, температурата и др., намирането на оптимално съчетание между тях представлява сложна и трудоемка задача.

Повечето известни подходи, например [6], разглеждат радиалното движение на кумулативната облицовка и корпуса в рамките на допускането, че влиянието на възникващите в материалите напрежения е пренебрежимо малко в сравнение с налягането, създадено от продуктите на детонация. Съществуват, обаче, конструкции, при които геометричните характеристики на определена част от кумулативния заряд са такива, че това допускане е нереално. Например, в основата на кумулативната облицовка, слой от взривно вещество може да бъде толкова тънък, че налягането от продуктите на детонация да стане съизмеримо с възникващите в материала напрежения. Именно в такива случаи физичните и механичните характеристики оказват съществено влияние върху параметрите на процесите на формиране на кумулативната струя, както показват резултатите от извършеното изследване.

Целта на статията е да се изследват влиянието на напреженията и температурните изменения, възникващи в материала на кумулативната облицовка на различни разстояния от върха ѝ.

2. ОПРЕДЕЛЯНЕ СКОРОСТТА НА РАДИАЛНОТО ДВИЖЕНИЕ НА КУМУЛАТИВНАТА ОБЛИЦОВКА

При радиалното движение на кумулативната облицовка и корпуса на кумулативен заряд, под действието на налягането на продуктите на детонация, в материалите възникват тангенциални напрежения, които са еднородни по цялата дебелина на облицовката и корпуса в случай, че последните са тънкостенни, и съществено нееднородни в случай на дебелостенни

цилиндри [7–9]. Повечето от реалните конструкции позволяват да се приеме, че в началото корпусът и кумулативната облицовка са тънкостенни. В процеса на формиране на кумулативната струя, обаче, корпусът се раздува и все повече изтънява, докато кумулативната облицовка се свива и в определен момент от своето движение тя може да се счита за дебелостенен цилиндър. С цел проследяването на качествения характер и опростяването на изчислителната схема, е прието на първо време, че тангенциалните свиващи напрежения по дебелината на кумулативната облицовка са разпределени равномерно.

Изчислителната схема е представена подробно в [6] и аналогично на този подход е разгледан сектор от произволен i -ти слой (фиг. 1).

Записани са уравненията за движение на елементите на корпуса и кумулативната облицовка – индексът „1“ се отнася за параметрите и характеристиките на корпуса, а „2“ – за тези на кумулативната облицовка:

Фиг. 1. Изчислителна схема за определяне скоростта на радиалното движение на кумулативната облицовка и корпуса

Fig. 1. Calculation scheme of determining the velocity of radial movement of the cumulative liner and the casing

$$\begin{aligned}
m_1(z) \frac{du_1(z, t)}{dt} &= P(z, t) \cdot S_1(z, t) - 2\sigma_1(z, t) \cdot S'_1(z, t) \cdot \sin \frac{d\varphi}{2}, \\
m_2(z) \frac{du_2(z, t)}{dt} &= -P(z, t) \cdot S_2(z, t) + 2\sigma_2(z, t) \cdot S'_2(z, t) \cdot \sin \frac{d\varphi}{2}, \\
\frac{d\eta(t)}{dt} &= u_1(z, t), \\
\frac{dr(t)}{dt} &= u_2(z, t),
\end{aligned} \tag{1}$$

където $m_1(z)$ и $m_2(z)$ са масите на елементите на корпуса и кумулативната облицовка, съответно за даденото сечение; $\delta_1(z, t)$ и $\delta_2(z, t)$ – текущите дебелини в процеса на движение на корпуса и кумулативната облицовка; ρ_1 и ρ_2 – плътностите на материалите на корпуса и кумулативната облицовка; $u_1(z, t)$ и $u_2(z, t)$ – скоростите на материалите на корпуса и кумулативната облицовка; $S = [r(z, t) + \delta(z, t)] \cdot d\varphi \cdot dz$ – текущата площ на външната повърхност на разглеждания елемент от кумулативната облицовка, върху която действа налягането; $P(z, t)$ – закон за изменение на налягането, създадено от продуктите на детонация; ρ – плътност на снарядаване на взривното вещество; σ_1, σ_2 – тангенциалните напрежения, възникващи в материалите на корпуса и кумулативната облицовка, вследствие на тяхното съвместно движение (които ще бъдат разгледани по-нататък); S'_1, S'_2 – текущи значения на площите, върху които действат напреженията.

Получена е система от четири обикновени диференциални уравнения от първи ред с четири неизвестни $u_1(z, t)$, $u_2(z, t)$, $r(z, t)$ и $\eta(z, t)$ и четири допълнителни условия, а именно:

$$\begin{aligned}
u_1(z, t_0) &= 0, \\
u_2(z, t_0) &= 0, \\
r(z, t_0) &= r_0(z), \\
\eta(z, t_0) &= \eta_0(z).
\end{aligned} \tag{2}$$

По този начин, за произволен слой с координати $z_i \in [z_0; z_0 + H]$, аналогично на [1], решавайки числено задачата на Коши (1) ... (2), може да се опише радиалното движение на съответните елементи на корпуса и кумулативната облицовка. Ограничаващият фактор за прекратяване на процеса на численото решаване на задачата е изпълнението на условието:

$r(z_i, \tau_i) = 0$, където τ_i е времето, необходимо на елемента от кумулативната облицовка в i -я слой да достигне до оста на симетрия на кумулативния възел. Определянето на ъгъла на среща на елемента от кумулативната облицовка с оста OZ се извършва по методиката, описана в [6].

3. ОТЧИТАНЕ НА ФИЗИЧНИТЕ И МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА МАТЕРИАЛИТЕ

В процеса на високоскоростно ударно деформиране на корпуса и кумулативната облицовка, под действието на продуктите на детонация, в тях възникват не само еластични, но и пластични деформации, които намаляват скоростите на радиално движение. От друга страна, високоскоростното нееластично деформиране на металите води до повишаване на температурата им, вследствие на което техните свойства се променят значително [7, 10].

3.1. Изометрична постановка

За еластично-пластичните материали, механичните характеристики зависят както от величината на деформациите, така и от величината на скоростта на деформациите, т.е.

$$\sigma = \sigma \left(\varepsilon, \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (3)$$

където: σ – напрежения; ε деформация; $\frac{d\varepsilon}{dt}$ – скорост на деформацията (деформирането на тънка кумулативна облицовка е едновременно).

Конкретният вид на уравнение (3) се получава чрез обработване на експериментални данни, получени за материалите при различни, фиксирани значения на скоростите на деформация [10]. Следователно, във всеки един момент от процеса на деформация могат да бъдат определени напреженията в кумулативната облицовка и корпуса:

$$\begin{aligned} \sigma_1(z, t) &= \sigma_1[\varepsilon_1(z, t), \frac{d\varepsilon_1}{dt}(z, t)], \\ \sigma_2(z, t) &= \sigma_2[\varepsilon_2(z, t), \frac{d\varepsilon_2}{dt}(z, t)], \end{aligned} \quad (4)$$

където тангенциалните деформации се определят като

$$\varepsilon_1 = \frac{\eta(z, t) - \eta(z, 0)}{\eta(z, 0)}, \quad \varepsilon_2 = \frac{r(z, t) - r(z, 0)}{r(z, 0)}, \quad (5)$$

а скоростите на деформация

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{u_1(z, t)}{\eta(z, 0)}, \quad \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{u_2(z, t)}{r(z, 0)}. \quad (6)$$

3.2. Неизотермична постановка

Както вече беше посочено, свойствата на металите зависят съществено от скоростта на деформация и от абсолютната температура, като в условията на високоскоростно деформиране те се нагряват значително. В този случай (3) придобива вида:

$$\sigma = \sigma \left(\varepsilon, \frac{d\varepsilon}{dt}, T \right), \quad (7)$$

където T е температурата в процеса на деформация и се определя по формулата [10]

$$T(z, t_2) - T(z, t_1) = \frac{F}{J \cdot \rho \cdot C} \int_{\varepsilon(z, t_1)}^{\varepsilon(z, t_2)} \sigma(z, \varepsilon) \cdot d\varepsilon, \quad (8)$$

F е коефициентът на прехода на пластичната работа в топлинна (приема се равен на единица); J – размерен коефициент (в системата СИ е равен на единица); ρ – плътност на материала; C – специфично топлопоглъщане.

За да се установи отношението между изменението на температурата и механичните характеристики на материала, е прието допускането, че пропорционално на увеличаването на температурата металите стават все по-пластични, като при достигане на температурата на топене техните механични характеристики са равни на нула, т.е. те са във вид на течност (плазма), а изменението на механичните характеристики става по права линия.

4. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ЧИСЛЕНОТО РЕШЕНИЕ

Решаването на системата от уравнения (1)...(2) е аналогично на извършеното в [6] и е осъществено за три случая, а именно: без отчитане на възникващите напрежения, с отчитане само на напреженията и с отчитане на напреженията и температурата на материалите.

Резултатите от численото симулиране показват, че механичните характеристики на материалите и температурните изменения оказват съществено влияние върху деформирането на елементите на кумулативната облицовка, разположени най-далеч от върха ѝ. На *фигура 2* е показано разпределението на скоростта на радиалното движение на кумулативната облицовка във времето за елемент № 1000 (от общо 1000), без да се отчитат напреженията (горната крива) и с отчитане на възникващите напрежения (долната крива). Влиянието на температурните изменения е много малко и не е показано на графиката, но по принцип води до намаляване на съпротивлението на материала в процеса на деформация.

Фиг. 2. Разпределение на скоростта на радиалното движение на кумулативната облицовка във времето

Fig. 2. Distribution of the velocity of radial movement of the cumulative liner over the time

Предложеният подход за отчитане на физико-механичните характеристики на материалите позволява по-задълбочено анализиране на процесите, протичащи при високоскоростното деформиране на кумулативната облицовка и формирането на кумулативната струя. Въпреки факта, че за анализирането на една конструкция е необходимо много машинно време, в случаите на конструиране на заряди със специално предназначение това е оправдано, тъй като дава необходимата представа за физиката на процесите.

REFERENCES

- [1] K. K. ANDREEV AND A. F. BELIAEV, *Theory of explosives*, Moscow, Oboronprom (1960) 595 (in Russian).
- [2] W. WALTERS, *Introduction to Shaped Charges*, Report No ARL-SR-150, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, USA (March 2007) 110.
- [3] T. A. E. ELSHENAWY, *Criteria of Design Improvement of Shaped Charges Used as Oil Well Perforators*, Ph.D. Thesis, The University of Manchester, School of Mechanical Aerospace and Civil Engineering (2012) 252.
- [4] S. PETKOV AND V. NIKOLOVA, Modeling Dynamic Properties of the Cumulative Coating Material and Shell in Cumulative Unit, in Proceedings of Vth International Scientific and Technical Conference "Engineering, Technologies, Education, Security, 2017, 1, 94–98, ISSN 2535-0323 (in Bulgarian).
- [5] H. SHEKHAR, Theoretical Modelling of Shaped Charges in the Last Two Decades (1990–2010): A Review, *Central European Journal of Energetic Materials* (2012) **9** (2) 155–185, ISSN 1733-7178.
- [6] K. A. BOIADJIEV, *Physical and mathematical modelling of the process of the cumulative jet formation*, Military Research-Technical Institute, Sofia (1995) (in Bulgarian).
- [7] N. I. BEZUHOV, *Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep*, High School, Moscow (1981) (in Russian).
- [8] S. P. PETKOV, *Deformation and destruction response of shell assemblies to pulsed loading*, TulGU, Russia (2006) 297, ISBN 5-7679-0294-1 (in Russian).
- [9] V. I. BARANOV AND S. P. PETKOV. Modeling the behavior of metals in high-speed impact loads, *Engineering Sciences* (2005) **XLII** (3) 41–48, ISSN: 1312-5702 (in Bulgarian).
- [10] V. L. BARANOV AND V. Y. KAMCHATNIKOV, *The governing equations for materials sensitive to changes in strain rate and temperature*, Collection of scientific papers "Research in the field of plasticity and metal pressure treatment". TulPI, Russia (1997) 154–159.

INFLUENCE OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIALS AND THE TEMPERATURE IN THE CUMULATIVE JET FORMATION

PETKO PETKOV

*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies
with Hydro-and Aerodynamics Centre „Acad. A. Balevski“,
Bulgarian Academy of Sciences,
67, Shipchenski Prohod Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mail: petko_st_petkov@abv.bg*

Abstract. Designing a shaped charge with preset characteristics of the cumulative jet is a complex engineering task that requires the consideration and balance between the factors affecting the cumulative jet formation. The influence of stresses and temperature changes occurring in the material of the cumulative liner at different distances from its top are investigated. On the basis of an approach proposed by the author, numerical simulation is performed to solve this task, allowing a deeper analysis of the processes involved in the high-speed deformation of the cumulative liner and the cumulative jet formation.

Keywords: shaped charge, cumulative jet, cumulative liner, mechanical properties, temperature.

Received August 05, 2019