

МНОГОЦЕЛЕВА ОПТИМИЗАЦИЯ НА ГЕОМЕТРИЯТА НА ЕЛАСТОМЕР В ЗАТВОРЕНА КАМЕРА**MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF GEOMETRY OF ELASTOMERS IN A CLOSED CELL**

Г.В.Дунчева, П. Н. Ненчев,

*Технически Университет – Габрово
Катедра “Машинни елементи и техническо чертане”*Статията е постъпила на **xx** юни 2011; приета за отпечатване на2011**Abstract**

This paper presents the outcomes from multi-objective optimization of the geometry of elastomer from concrete rubber material in a closed cell. This rubber has been used as a medium for pressure. Eight different variants of the elastomers geometry have been studied. For that purpose eight axisymmetrical finite element models have been developed. The model of Arruda-Boyce has been defined in the finite element models as a constitutive model of the rubber hyperelasticity. The vector optimization criterion consists of the following functions: coefficient of the force intensification, effective coefficient of the force intensification, input work in the system and the loss of available work. The task solution has been obtained on the basis of the regressional models of the objective functions and the genetic algorithm, using QStatLab package.

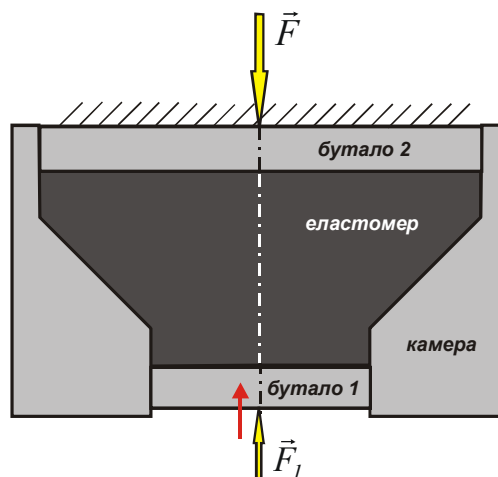
Keywords: multi-objective optimization; hyperelastic materials; finite element simulations; closed cell**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Приложението на хипереластични материали в техниката се базира основно на възможността да поемат големи деформации в комбинация с демпфиращите им способности. Поради това, в повечето случаи, функционалното предназначение на елементите от хипереластични материали е свързано с компенсиращата и вибропоглъщащата им способности. Направените проучвания, насочени към приложението на еластомерите в голямото разнообразие от затягащи механизми показва, че те изпълняват преди всичко спомагателни функции (например обезпечаване на допълнителни премествания в технологичният процес на затягане) [1]. Същевременно почти липсват разработки, в които през еластомера преминава силов поток, насочен към обекта на закрепване. При това почти не са известни приложения на еластомери в качеството им на среда за предаване на налягане, при които да е налице усилване при трансформацията на силовия поток в посока към обекта на затягане [2]. Предвид спецификата на проблема, целесъобразно да се използват почти несвиваемите хипереластични материали (с коефициент на Poisson $\approx 0,5$) като например - гумените смеси [3].

За цела еластомерът с форма на пресечен конус и два къси цилиндрични участъка се помещава без хлаби в затворена стоманена камера (фиг. 1).

За количествена оценка на трансформацията на силовия поток в еластомера, е въведен коефициент на усилване $k = F_2 / F_1$, където F_1 и F_2 са съответно входящата и изходящата сили, приложени съответно върху бутало 1 и бутало 2 (фиг. 1). Очевидно, за постигане на максимален коефициент на усилване, е необходимо да се решат две основни задачи - избор на подхо-

дяща гумена смесь и оптимизиране на геометрията на камерата, респ. геометрията на еластомера.



Фиг. 1 Схема на изследваната механична система

На база на изследванията, направени в [3], е установено, че гумена смесь с твърдост ≈ 55 по Shore A осигурява най-голям коефициент на усилване и устойчиво поведение при равни други условия. Еластомери от такава гумена смесь са обект на настоящото изследване.

Основна цел на настоящото е посредством крайно-елементен подход да се оптимизира геометрията на еластомер от конкретна гумена смесь в съответствие с механичната система, показана на фиг. 1 с оглед на приложението в затягащи механизми с универсално приложение.

2. ПОСТАНОВКА НА ОПТИМИЗАЦИОННАТА ЗАДАЧА

В общия случай оптимизирането на технически изделия и процеси се свежда до съставяне и решение на многокритериална оптимизационна задача [4]. Управляващите фактори X_k в целевите и ограничителните функции са параметрите на изследвания процес.

Формулира се и се решава следната оптимизационна задача на нелинейното програмиране [5, 6]. Дадени са целевите функции Y_i , компоненти на векторния критерий $\{Y(\{X\})\}$, и ограничителни функции F_j , компоненти на вектора $\{F(\{X\})\}$:

$$\begin{aligned} \{Y(\{X\})\} &= [Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_n]^T; \\ \{F(\{X\})\} &= [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_m]^T, \end{aligned}$$

зависещи от управляващите фактори:

$$\{X\} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_k]^T.$$

За F_j и X_k са известни зависимостите:

$$\begin{aligned} F_{j'}(\{X\}) &\leq F_{j',max} \quad \forall j' = 1, 2, \dots, m', \\ F_{j''}(\{X\}) &\geq F_{j'',min} \quad \forall j'' = 1, 2, \dots, m'', \end{aligned} \quad (1)$$

$$m' + m'' = m,$$

$$X_{k,min} \leq X_k \leq X_{k,max}; \quad \{X\} \in \Pi_X$$

Трябва да се намери числовият вектор $\{X^*\}$, за който множеството целеви функции $Y_i\{X^*\} \forall i = 1, 2, \dots, n$ ще удовлетвори комплекс от компромисни изисквания [7]. В идеалния случай:

$$\begin{aligned} Y_{i'}\{X^*\} &= Y_{i',min}; \quad Y_{i''}\{X^*\} = Y_{i'',max}, \\ i' + i'' &= i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (2)$$

при което $\{X^*\} \in \Pi_X$.

Най-широко приложение за решение на поставената многокритериална задача е намерил подходът на скалариране на векторния критерий.

В настоящото изследване векторният оптимизационен критерий съдържа следните функции:

- Коефициент на усилване k ;
- Ефективен коефициент на усилване $k_{ef} = k / k_i$,

където k_i е идеалният коефициент на усилване (в случай на идеален флуид);

• Вложената на входа на системата работа \bar{A}^e, Nmm ;

• Загубата на наличната работа $A_l = \bar{A}^e - A^i, Nmm$, където A^i, Nmm е работата, вложена за деформиране на еластомера.

За обезпечаване на оптимална геометрия на еластомерите, е необходимо първите две функции да приемат максимални стойности, а последните две – минимални.

Отчитайки спецификата на изследвания проблем, както и значителната икономия на средства и време, е целесъобразно да се приложат числени симулации [8, 9, 10]. Степента на адекватност на крайно-елементния модел основно зависи от следните условия:

- Реалистичност на геометрията на обектите;
- Реалистичност на геометричните и силовите гранични условия, респ. точно дефинирани на движенията и взаимодействията между обектите;

• Създаване на подходящ конститутивен модел, описващ най-точно поведението на конкретния ХМ [11, 12, 13].

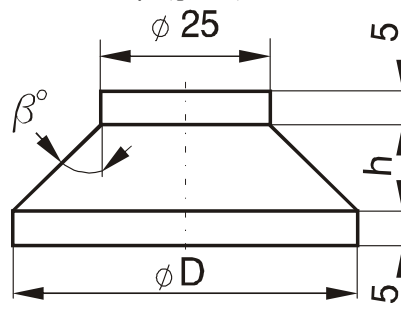
В [3] е доказано, че подходящият конститутивен модел, описващ поведението на изследваната ГС е моделът на *Arruda-Boyce*. Той се базира върху специфичната потенциална енергия на деформация Ω , т.е. върху енергията на деформация натрупана за единица обем. На тази база оптимизацията е проведена при следните основни приемания:

• Обемът на еластомера е постоянен, т.е. $V = 35877,16 \text{ mm}^3 = \text{const}$;

• Диаметърът на малкото бутало е постоянен, т.е. $d = 25 \text{ mm} = \text{const}$;

• Височината на цилиндричните участъци на еластомера е постоянна, т.е. $h_i = 5 \text{ mm} (i = 1, 2)$.

Следователно, всички останали геометрични параметри на еластомера, респ. на камерата, са функции единствено на ъгъла β (фиг. 2).



Фиг. 2 Постоянни и променливи параметри на еластомера

В табл. 1 са показани променливите геометрични параметри на изследваните варианти.

Променливи геометрични параметри		Таблица 1	
№ вариант	β°, deg	D, mm	h, mm
1	30	42,3743	15,0466
2	45	50	12,5
3	55	55,9673	10,8418
4	60	59,5212	9,9654
5	65	63,7039	9,0240
6	70	68,8521	7,9804
7	75	75,5842	6,7770
8	80	85,2248	5,3096

Решението е извършено посредством генетичен алгоритъм, развит в QStatLab [16].

3. КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНО МОДЕЛИРАНЕ

3.1. Обща характеристика

Предвид физическата същност на изследвания проблем, изследването е проведено посредством ососиметрични крайно-елементни модели. Броят на разработените КЕ модели съответства на броя на анализирания варианти (виж табл. 1). За всеки анализиран вариант, геометрията на еластомера, респ. на камерата, съответс-

тва на параметрите, посочени в табл. 1. Бутало 1 и бутало 2, както и камерата са моделирани като идеално твърди, а еластомерите са моделирани като твърди деформируеми тела (фиг. 1).

Между еластомера и елементите на камерата е дефиниран тангенциален и нормален контакт с възможност за отделяне, като е приложена техниката “master” и “slave” повърхнини [3]. За изследвата гумена смес е зададен коефициент на триене при плъзгане 0.8 в съответствие с получени експериментални резултати [14].

Максималната стойност на входното кинематично въздействие за всички анализирани варианти е 1 mm и е зададено посредством табулирана функция на псевдовремето. Входящата и изходящата сили, отнесени съответно към бутало-1 и бутало-2, се получават като реакции в т.н. Reference point (RP) на моделите на същите. С оглед на коректни KE резултати е приет постоянен среден размер на KE – 1 mm.

3.2. Конститутивен модел на материала на еластомерите

Във всички крайно-елементни модели поведението на материала на еластомера е зададено посредством модела на Arruda-Boyce, чиято адекватност е доказана в [3]:

$$\Omega = G \left[\frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4} (\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6} (\bar{I}_1^3 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8} (\bar{I}_1^5 - 243) \right] + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (3)$$

където: Ω специфичната потенциална енергия на деформация; G , λ_m и D са температурно зависими материални параметри; \bar{I}_1 е първи инвариант на девиатора на деформациите, дефиниран като:

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2, \quad (4)$$

$\bar{\lambda}_i$ са девиаторни удължения: $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \cdot \lambda_i$; J е пълен обемен коефициент (отношение на текущ обем към първоначален); J_{el} е еластичен обемен коефициент; λ_i са главни удължения (отношения на текущите дължини на елементарни отсечки в околност на точка към първоначалните им дължини по направления; $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$; ε_i са главни линейни деформации);

Началният модул на ъгловите деформации G_0 се изразява посредством G чрез израза:

$$G_0 = G \left(1 + \frac{3}{5\lambda_m^2} + \frac{99}{175\lambda_m^4} + \frac{513}{875\lambda_m^6} + \frac{42039}{67375\lambda_m^8} \right).$$

Типична големина за λ_m е 7, откъдето $G_0 = 1,0125G$. Началният модул на обемната деформация K_0 се изразява посредством параметъра D чрез израза: $K_0 = 2/D$. Намерени са следните материални константи: - $G = 1,8516824$; $G_0 = 1,87480038$; $\lambda_m = 7,00020847$; $D = 0,0432$.

3.3. Крайно-елементни резултати

Проведен е статичен “stress analysis”, базиран върху разработените KE модели. Разпределението на екви-

лентните напрежения $\sigma_{екв}$, MPa в еластомерите за четири от изследваните варианти и получените от числените симулации стойности на целевите функции са показани в табл. 2.

Анализът е проведен чрез системата за инженерен анализ ABAQUS v. 6.5-1 [15].

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ОПТИМИЗАЦИЯТА

4.1. Регресионни модели

Последователно са изградени регресионни модели на целевите функции:

k , k_{ef} , \bar{A}^e , Nmm и A_l , Nmm в зависимост от ъгъл β .

Решението е намерено посредством системата за статистически анализ QStatLab [16]. Получени са следните регресионни модели:

1). Регресионен модел на k

Обозначения:

x1 <--> beta

y <--> k-yc

$$y = 0.778 + 0.034x1 + 0.000x1x1$$

2). Регресионен модел на k_{ef}

Обозначения:

x1 <--> beta

y <--> k-ef

$$y = 0.485 + 0.011x1 - 0.000x1x1$$

3). Регресионен модел на \bar{A}^e , Nmm

Обозначения:

x1 <--> beta

y <--> Ae

$$y = 991.262 - 22.428x1 + 0.876x1x1 - 0.015x1x1x1 + 0.000x1x1x1x1$$

4). Регресионен модел на A_l , Nmm

Обозначения:

x1 <--> beta

y <--> A_lost

$$y = -300.234 + 24.885x1 - 0.453x1x1 + 0.003x1x1x1$$

4.2. Оптимално решение

Решението е извършено посредством генетичен алгоритъм, развит в QStatLab [16]. Намерено е следното оптимално решение:

*** Генетичен алгоритъм (GA);

OBJ1 --> Model_A-lost

OBJ2 --> Model_k-yc

OBJ3 --> Model_k-ef

OBJ4 --> Model_Ae

Model_A-lo(MIN); Model_k-yc(MAX);

Model_k-ef(MAX); Model_Ae(MIN);

*** Оптимално решение :

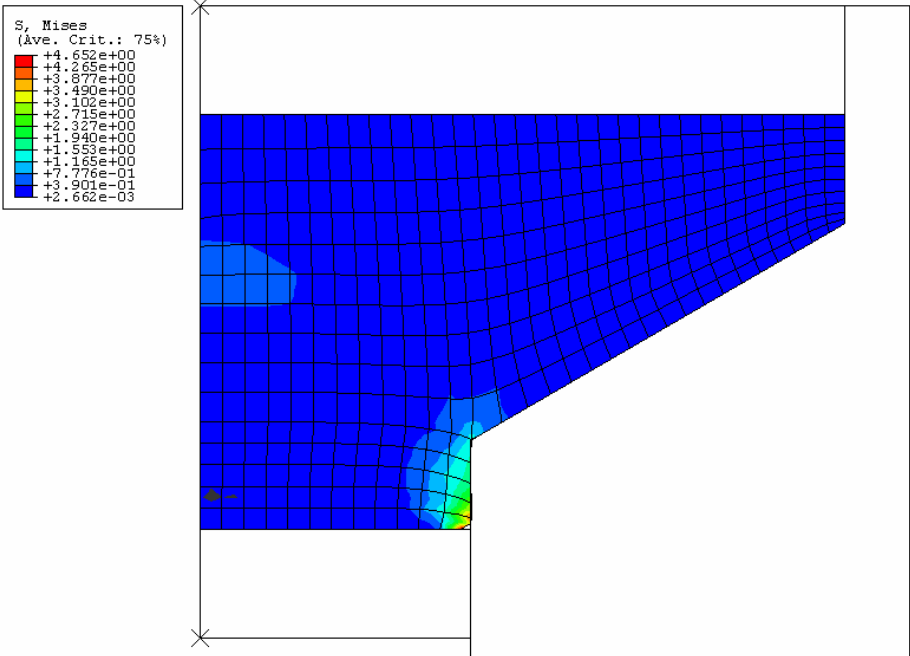
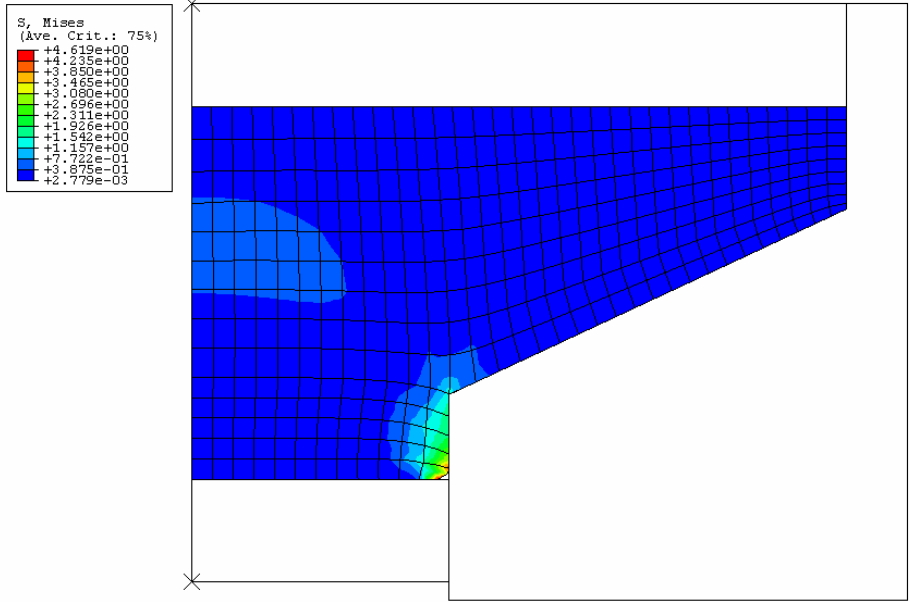
No	VAR1	OK?	OBJ1	OBJ2	OBJ3	OBJ4
2452	73,8945	Да	101,9820	4,2354	0,4801	645,3393

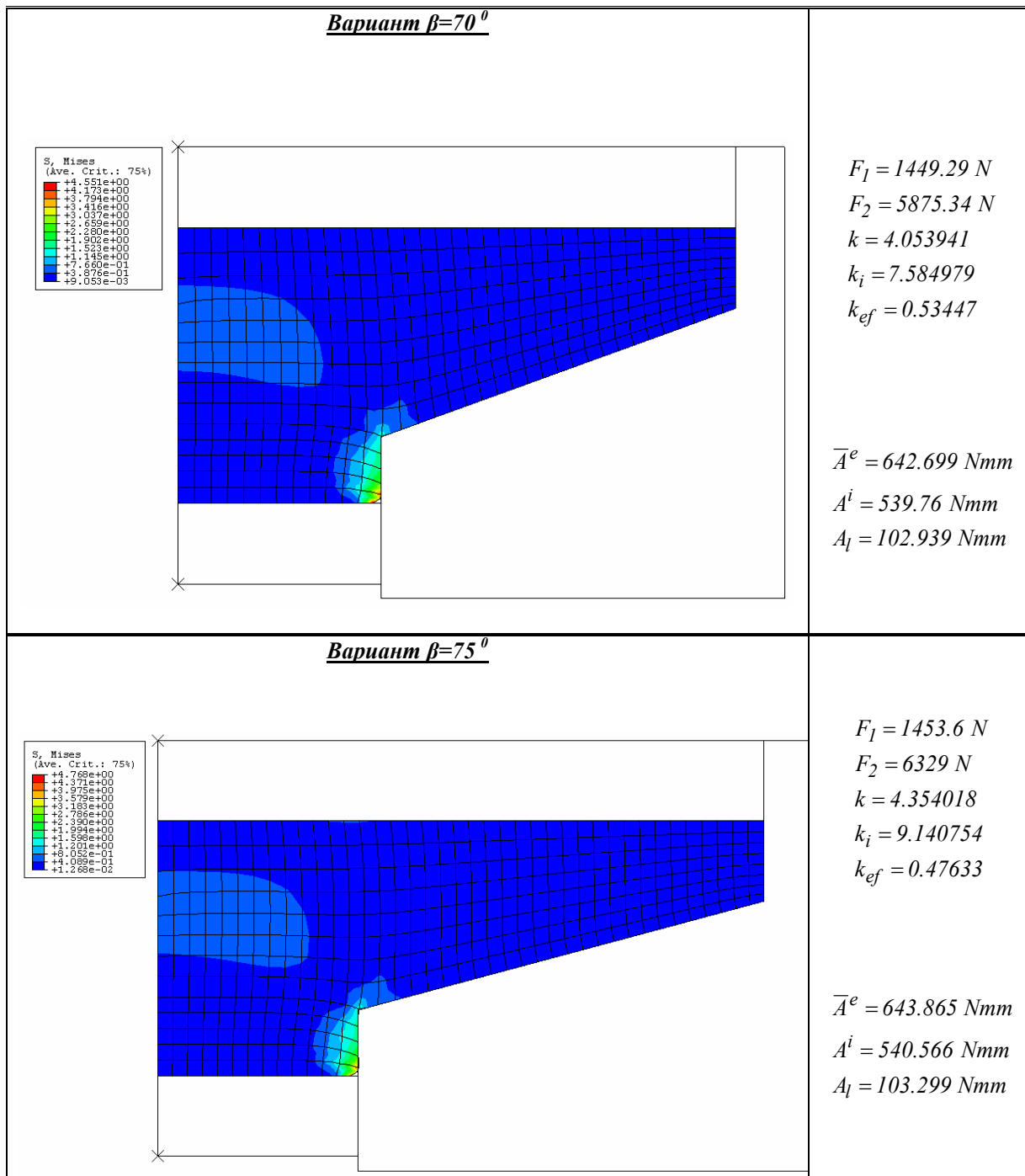
Оптималното решение съответства на ъгъл $\beta = 73.8945^\circ$. За тази стойност на ъгъл β е получен коефициент на усилване $k = 4.2354$. Обобщавайки, и като са взети предвид конструктивни ограничения, се

приема, че оптималната геометрия на еластомера съответства на ъгъл $\beta = 70^\circ$.

Крайно-елементни резултати

Таблица 2

<p style="text-align: center;">Вариант $\beta=60^\circ$</p> 	<p> $F_1 = 1500.18 \text{ N}$ $F_2 = 5147.85 \text{ N}$ $k = 3.431488$ $k_i = 5.668437$ $k_{ef} = 0.605368$ </p> <p> $\bar{A}^e = 664.921 \text{ Nmm}$ $A^i = 559.119 \text{ Nmm}$ $A_l = 105.802 \text{ Nmm}$ </p>
<p style="text-align: center;">Вариант $\beta=65^\circ$</p> 	<p> $F_1 = 1475.64 \text{ N}$ $F_2 = 5489.86 \text{ N}$ $k = 3.720325$ $k_i = 6.493099$ $k_{ef} = 0.572966$ </p> <p> $\bar{A}^e = 672.05 \text{ Nmm}$ $A^i = 551.216 \text{ Nmm}$ $A_l = 120.834 \text{ Nmm}$ </p>



5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За намиране на оптималната геометрия на еластомер от конкретна гумена смес, поставен без хлабина в затворена камера е формулирана многоцелева оптимизационна задача. Тя се базира върху постигане на максимално усилване на силовия поток, преминаващ през еластомера в условията на относително най-малки загуби. Задачата е решена посредством числени симулации, проведени на основата на ососиметрични крайно-елементни модели, в които поведението на материала е зададено посредством модела на *Arruda-Boyce*.

Оптимизираната геометрия на еластомера може да се използва за разработване на затягащи механизми в технологични процеси, характеризиращи се с колебания или вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ненчев П., Дунчева Г., Анализ и синтез на затягащи механизми, съдържащи елементи от хипереластични материали чрез прилагане на диференциално-морфологичния метод, Известия на ТУ – Габрово, 36, 2008, 15-22.
2. Максимов Й. Т., Ненчев П. Н., Относно възможността за използване на каучукови смеси като среда за предаване на налягане, АМТЕХ'03, Варна, 2003, т.2, с.126-129.
3. Дунчева Г., Ненчев П., Максимов Й., Анчев А., Крайно-елементно изследване на поведението на хипереластични материали в затворена камера, Меж-

дународна научна конференция UNITECH' 2008, vol. II, 87-98.

4. Maximov J.T., Optimization method for metal-forming processes, Energy, vol. 27, № 7, pp. 675-701, 2002.

5. Стоянов С. К., 1993. Оптимизация на технологични процеси. С., Техника.

6. Стоянов С. К., 1990. Методи и алгоритми за оптимизация. С., Техника.

7. Стоянов С. К., 1983. Оптимизация на технологични обекти. С., Техника.

8. Maximov JT, Duncheva GV., A new 3D finite element model of the spherical mandrelling process. Finite Elements in Analysis and Design, 44 (6-7) 372-382, 2008.

9. Meske R, Sauter J, Friedrich M. Optimization of Elastomer-Metal Components with TOSKA and ABAQUS. FE the Optimization Company, Report, June, 2006.

10. Reese S, Raible T, Wriggers P. Finite element modeling of orthotropic material behaviour in pneumatic membranes. International Journal of Solids and Structures 2001;38(52):9525-9544.

11. Arruda EM, Boyce MC. A three-dimensional constitutive model for the Large stretch behaviour of rubber elastic materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1993;41(2): 389-412.

12. Bischoff JE, Arruda EM, Grosh. A New Constitutive Model for the Compressibility of Elastomers at Finite Deformations. Rubber Chemistry and Technology 2001;74(4):541-559.

13. Feng ZQ, Vallee C, Fortune D, Peyraut F. The 3e hyperelastic model applied to the modeling of 3D impact problems. Finite Elements in Analysis and Design 2006; 43(1):51-58.

14. Петков С.И., Ненчев П., Анчев А.П., Дунчева Г.В., Експериментално изследване на коефициента на триене при взаимодействие между стомана и хипереластични материали, Механика на машините, 73, с.15-19.

15. Hibbit, Karlsson and Sirensen Inc. ABAQUS/CAE Theory Manual, Version 6.5, ABAQUS Inc. Rising Sun Mills, 166 Valley Street Providence, RI 02909-2499, 2004.

16. Вучков И. Н., Вучков И. И., 2009. Програмен продукт QStatLab Professional, версия 5.4. Ръководство за потребителя, София.

The study was supported by contract № BG051PO001-3.3.04/28, "Support for the Scientific Staff Development in the Field of Engineering Research and Innovation". The project is funded with support from the Operational Programme "Human Resources Development" 2007-2013, financed by the European Social Fund of the European Unio

