

JACEK JACKIEWICZ

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

OPTIMALIZACJA WŁASNOŚCI POROWATYCH SPIEKÓW NISKOWĘGLOWEJ STALI ZA POMOCĄ ALGORYTMU GENETYCZNEGO

W pracy rozpatrzono metody wytwarzania porowatych materiałów metalicznych. Podstawowym celem pracy było określenie wpływu geometrii porowatej struktury na makroskopowe, mechaniczne własności porowatych materiałów metalicznych. Przyjęto, że porowaty materiał metaliczny z kontrolowaną geometrią porowatej struktury może być wytwarzany w wyniku zastosowania iskrowo-plazmowego spiekania ferromagnetycznych segmentów metalicznych o specjalnym wydłużonym kształcie. Segmenty te są umieszczone w bloku matrycy, przy czym ich ustawienie jest ustalone za pomocą zewnętrznego, statycznego pola magnetycznego. Geometria struktury porowatej stali niskowęglowej może być modyfikowana w celu ulepszenia jej mechanicznych własności, ponieważ jej kształt istotnie wpływa na mechanizmy deformacji i rozwoju uszkodzeń, które są spowodowane poprzez oddziaływanie różnych rodzajów obciążeń zewnętrznych. Optymalny kształt porowatej struktury determinujący wymagane, makroskopowe jej własności mechaniczne jest określony za pomocą schematu przeszukiwań algorytmu genetycznego.

Słowa kluczowe: metalowe materiały komórkowe, strategie ewolucyjne, złożony model Gursona, spiekanie iskrowo-plazmowe

1. WSTĘP

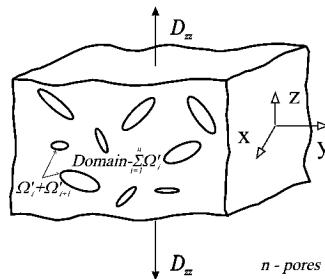
Materiały porowate łączą w sobie wiele ważnych własności fizycznych i mechanicznych takich, jak: duża sztywność w połączeniu z małym ciężarem lub duża przenikalność przez płyny wraz z wysokim przewodnictwem cieplnym. Z tej przyczyny materiały o porowatej strukturze są rozpowszechnione w naturze. Kiedy siły natury tworzą duże struktury, zwykle posługują się materiałami porowatymi (np. drewnem, kośćmi lub koralowcami), natomiast współczesny człowiek nadal powszechnie korzysta tylko z materiałów litych, a mianowicie stali, betonu i szkła. Mniej jest wiadomo, że również metale mogą zostać wytworzone jako materiały porowate. Z uwagi na istotne cechy własne metalicznych materiałów porowatych, ich nowe zastosowania są oczekiwane w niedalekiej przyszłości.

Możemy wyróżnić następujące metody wytwarzania metalicznych materiałów porowatych [1]:

- wytwarzanie ze stanu stałego metali porowatych przez spiekanie proszków lub włókien metalicznych,
- wytwarzanie ze stanu ciekłego metali porowatych przez odlewanie stopionego metalu dookoła wypełniacza lub przez topienie proszku metalicznego zawierającego odczynnik wyzwalający gaz,

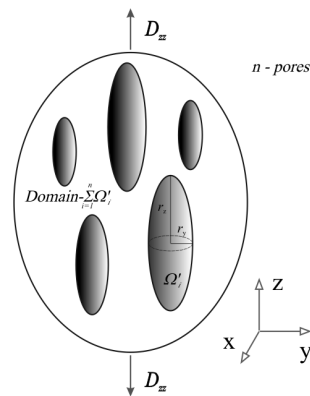
- osadzanie elektrolityczne metali na polimerowych piankach o otwartej strukturze komórek,
- osadzanie próżniowe skondensowanych metali na powierzchni zimnego prekursora.

Większość znanych procesów technologicznych wytwarzania metalicznych materiałów porowatych nie umożliwia kontroli kształtu, wielkości i dystrybucji porów w materiale (rys. 1). W wyniku, czego uzyskiwany jest duży rozrzut ich mechanicznych oraz fizycznych własności.



Rys. 1. Konwencjonalna struktura porowatego metalu, w którym osie główne elipsoidalnych porów są ustawione w różnych kierunkach

Jednakże, większość naturalnych materiałów porowatych ma uporządkowaną strukturę porów, która jest dopasowana do warunków działających na nią obciążeń zewnętrznych. Do takiej uporządkowanej struktury zaliczono przedstawioną na rysunku 2 strukturę wydłużonych cylindrycznych porów, które są ustawione w jednym kierunku.



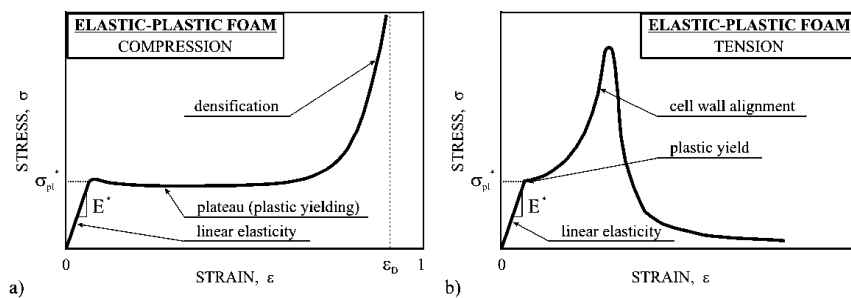
Rys. 2. Uporządkowana struktura porowatego metalu, w którym osie główne elipsoidalnych porów są ustawione wzdłuż jednego kierunku

2. WŁASNOŚCI MECHANICZNE METALI POROWATYCH

Podczas rozciągania lub ściskania metale porowate o uporządkowanej strukturze cylindrycznych porów są bardziej wytrzymałe od tych metali porowatych, w których cylindryczne pory są ustawione przypadkowo. Jak pokazano na rysunku 3a makrosko-

pową zależność naprężenia w funkcji odkształcenia dla ściskanego, porowatego ciała stałego może być scharakteryzowana za pomocą następujących trzech zakresów:

- zakresu odkształceń liniowo-sprężystych,
- zakresu stabilizacji wartości naprężenia, która jest spowodowana postępującym niszczeniem ścianek porowatej struktury, poprzez ich elastyczne wyboeczenie, następnie uplastycznienie, a także (w zależności od własności materiału matrycy) w wyniku ich kruchego pęknięcia,
- zakresu zagęszczania materiału porowatego.



Rys. 3. Schematyczne, jednoosiowe, makroskopowe wykresy zależności naprężeń od odkształceń dla: a) ściskanego materiału porowatego i b) rozciąganego materiału porowatego

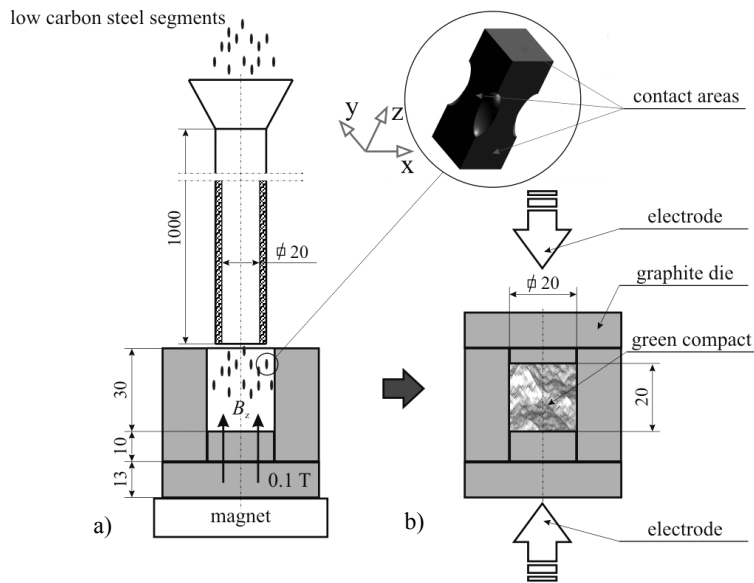
Natomiast na rysunku 3b zilustrowano makroskopową zależność naprężenia od odkształcenia dla rozciąganego, porowatego ciała stałego. Podobnie jak na rysunku 3a dla małych odkształceń możemy zaobserwować liniowo-sprężystą zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem. Gdy odkształcenia osiągną istotną wartość, następuje zwiększenie sztywności materiału, aż do chwili wystąpienia granicznej wytrzymałości tego typu materiału na rozciąganie.

3. NOWA METODA WYTWARZANIA POROWATEJ STALI NISKOWĘGŁOWEJ O UPORZĄDKOWANEJ STRUKTURZE

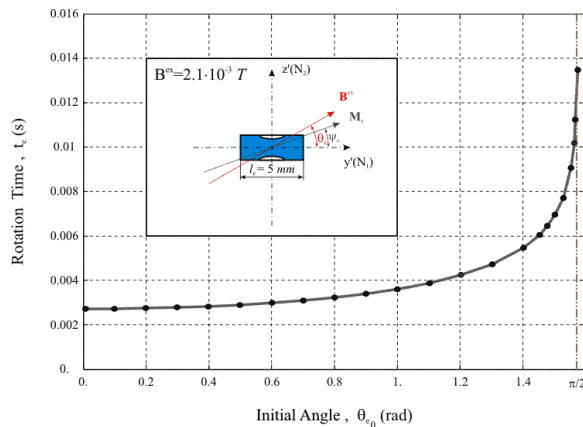
Nowa metoda wytwarzania porowatej stali niskowęglowej o uporządkowanej strukturze polega na iskrowo-plazmowym spiekaniu ferromagnetycznych segmentów w kształcie prostopadłościanu, jak przedstawiono na rysunku 4a. W celu uzyskania uporządkowanej struktury porowatej segmenty te posiadają elipsoidalne wycięcia. Segmenty te mogą być wykonane z litego materiału bądź też w wyniku iskrowo-plazmowego spiekania tzw. metalicznego 'nano-pudru' realizowanego w specjalnej matrycy kształtowej. Montaż ferromagnetycznych segmentów w grafitowej matrycy widocznej na rysunku 4a jest ułatwiony w wyniku zastosowania zewnętrznego, statycznego pola magnetycznego.

Magnes trwały o indukcji magnetycznej $0,1 T$ jest umiejscowiony pod grafitową matrycą i umożliwia uzyskanie jednorodnego pola magnetycznego o gęstości linii indukcji wynoszącej $B^{ex} = 2,1 \cdot 10^{-3} T$ na pewnej wysokości powyżej górnej krawędzi tej matrycy. Jednorodne pole magnetyczne orientuje jednokierunkowo opadające segmenty ferromagnetyczne – zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 5. Czas obrotu

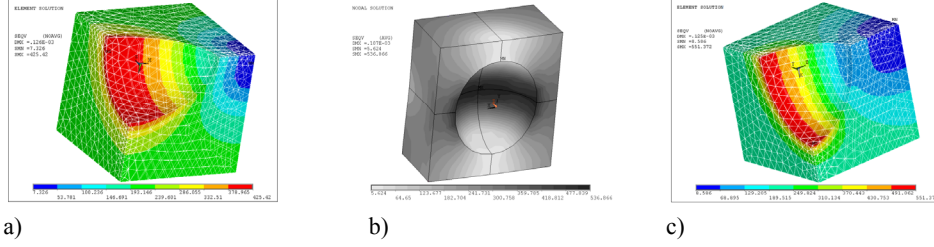
ferromagnetycznych segmentów jako funkcja inicjującej wartości kąta pomiędzy osią segmentu metalu y' a kierunkiem wektora indukcji jednorodnego pola magnetycznego \mathbf{B}^{ex} został określony w wyniku dwukrotnego, numerycznego całkowania różniczkowego równania dynamicznego ruchu obrotowego ferromagnetycznego segmentu za pomocą metody Newmarka. Zmontowane w ten sposób segmenty są iskrowo-plazmowo spiekane w temperaturze 1403 K w czasie 15 minut na podstawie zaleceń podanych w [2] (rys. 4b).



Rys. 4. Schematyczny widok doświadczalnej aparatury do wytwarzania porowatej stali niskowęglowej z kontrolowaną strukturą porów



Rys. 5. Czas obrotu ferromagnetycznych segmentów t_e jako funkcja inicjującej wartości kąta θ_{e0} pomiędzy osią segmentu metalu y' i kierunkiem jednoosiowego pola magnetycznego \mathbf{B}^{ex}



Rys. 6. Modele elementów skończonych: a) wydłużonych, b) sferycznych i c) spłaszczonych elipsoidalnych porów

4. ZŁOŻONY MODEL GURSONA

Złożony model Gursona [5] umożliwia rozpatrzenie wpływu struktury materiału porowatego na jego własności mechaniczne. W modelu tym pory są umieszczone w materiale matrycy w sposób uporządkowany wzdłuż jednego kierunku, a ich kształt może być elipsoidalny. Izotropowy warunek plastyczności tego modelu, dla materiału o porowatości f^* i zawierającego pory o współczynniku kształtu ξ , został sformułowany przez autora w następujący sposób:

$$\tilde{\Phi}_{EGA}(\mathbf{S}, f^*, \xi) \equiv \frac{S_{eq}}{D_{nom}} - \sigma_0(\kappa_p) = 0 \quad (1)$$

gdzie $S_{eq} \equiv \sqrt{\frac{3}{2} C_{EGA} S_{ij}^{(dev)} S_{ij}^{(dev)}}$ jest skalarnym ekwiwalentem makroskopowego tensora stanu naprężenia $\mathbf{S}(i, j = x, y, z)$, $\sigma_0(\kappa_p)$ jest granicą plastyczności określoną dla mikroskopowego odkształcenia plastycznego materiału matrycy κ_p . Parametr κ_p umożliwia określenie wzrostu powierzchni płynięcia granicy plastyczności. Natomiast parametrem, który uwzględnia zarówno wpływ makroskopowego naprężenia hydrostatycznego $S_h \equiv 2\alpha_{EGA} S_{xx} + (1 - 2\alpha_{EGA}) S_{zz}$ w danym materiale, jak również wpływ wielkości jego porów na zmianę wartości mikroskopowej granicy plastyczności matrycy materiału $\sigma_0(\kappa_p)$ jest:

$$D_{nom} \equiv \sqrt{g_{EGA}^2 - 2g_{EGA}q_{EGA}f_{EGA} \cosh\left(\frac{\kappa S_h}{\sigma_0(\kappa_p)}\right) + (q_{EGA}f_{EGA})^2} \quad (2)$$

gdzie g_{EGA} , q_{EGA} , f_{EGA} i κ stanowią parametry złożonego modelu Gursona. Zdefiniowane za pomocą tego parametru makroskopowe naprężenie efektywne $S_{eff} \equiv S_{eq}/D_{nom}$ jest osobiwe, gdy wartość parametru D_{nom} zmierza do zera.

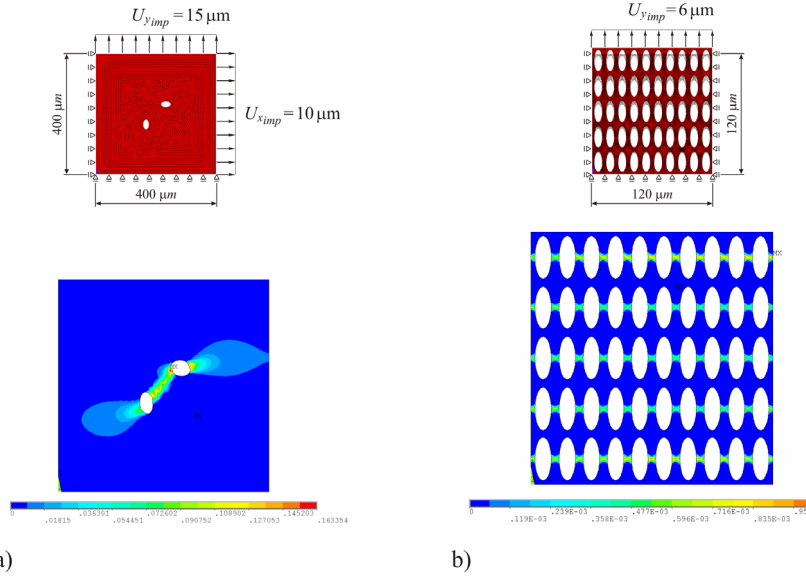
Złożony model Gursona uwzględnia możliwość wystąpienia dwóch postaci koalescencji porów w materiale, czyli dwie możliwości ich gwałtownego łączenia się. Dwie postacie koalescencji porów w materiale zostały przedstawione na rysunku 7. Dla zagadnienia optymalizacji struktury materiału porowatego druga postać koalescencji porów jest bardziej istotna. Została ona rozpatrzona w modelu teoretycznym Thomasona [6].

finite elements are associated with material properties of bilinear isotropic hardening:

elastic modulus of the material, $E = 210$ GPa,

yield stress, $\sigma_y = 580$ MPa

plastic tangent modulus of the material, $H = 1$ MPa



Rys. 7. Lokalizacja ekwiwalentnych odkształceń plastycznych w okolicach porów: a) pierwsza postać koalescencji występująca przy istotnej wartości współczynnika trójosiowego stanu makroskopowego naprężenia pomiędzy dwoma elipsoidalnymi porami, których osie wielkie są ustawione pod kątem prostym, b) druga postać koalescencji występująca przy jednoosiowym stanie makronaprężenia

Thomason oszacował możliwość wystąpienia zjawiska lokalizacji w wiązkach pomiędzy wydłużonymi porami, które jest wywołane poprzez nagły wzrost lokalnych naprężeń w tych miejscach. Zjawisko to jest rozpatrywane za pomocą następującego kryterium:

$$\tilde{\Phi}_{EGA}^{coalescence}(\mathbf{S}, f^*, \xi) \equiv \frac{\sqrt{\frac{2}{3} S_{ij}^{(dev)} S_{ij}^{(dev)} + |S_m|}}{(1 - \chi^2) D_{coalescence}(\chi, \lambda)} - \sigma_0(\kappa_p) = 0 \quad (3)$$

gdzie $\lambda \equiv a_v/b_v$ jest współczynnikiem określającym proporcję wymiarów reprezentatywnej objętości w kształcie walca, która zawiera elipsoidalny por o wymiarach A_v i B_v (A_v i B_v stanowią półosie pora o kształcie elipsoidy obrotowej),

$\chi \equiv B_v/b_v = (1,5 f^* \lambda e^{-\xi})^{1/3}$ określa wymiar wiązadła, a $D_{coalescence}(\chi, \lambda)$ jest osobliwą funkcją zdefiniowaną przez zależność:

$$D_{coalescence}(\chi, \lambda) = 0,1 \left(\frac{\chi^{-1} - 1}{\lambda^2 + 0,1\chi^{-1} + 0,02\chi^{-2}} \right)^2 + 1,3\sqrt{\chi^{-1}} \quad (4)$$

5. ZASTOSOWANIE ALGORYTMU GENETYCZNEGO DO OPTIMALIZACJI KSZTAŁTU STRUKTURY MATERIAŁU POROWATEGO

Do optymalizacji kształtu struktury materiału porowatego wykorzystano dwie metody, a mianowicie metodę ograniczonego sympleksu oraz jeden z algorytmów genetycznych – ewolucyjną strategię poszukiwań. Przy czym w trakcie obliczeń pierwsza z tych metod została odrzucona, ponieważ uniemożliwia ona określenie lokalnych minimum funkcji celu, które mogą wystąpić wraz z minimum globalnym.

W procesie optymalizacji poszukuje się takich wartości zmiennych decyzyjnych, dla których spełniony jest warunek, tzw. optymalnej funkcji celu. Optymalna wartość funkcji celu to albo wartość maksymalna, albo minimalna. Z reguły warunek maksymalizacji funkcji celu jest zastępowany warunkiem jej minimalizacji w wyniku kilku prostych przekształceń matematycznych. Istota zadania optymalizacyjnego jest podana w poniższym zestawieniu.

Znajdź zbiór poszukiwanych zmiennych decyzyjnych \mathbf{x}^c , gdy	
$F_{object}(\mathbf{x}^c)$ osiąga <u>minimum</u>	poszukiwanie minimum funkcji celu
$\underline{x}_k^c \leq x_k^c \leq \bar{x}_k^c, k = 1, 2, \dots, m$	warunki brzegowe dla poszukiwanych zmiennych decyzyjnych
$\underline{g}_{i_1} \leq g_{i_1}(\mathbf{x}^c), \quad i_1 = 1, 2, \dots, n_1$ $\bar{h}_{i_2}(\mathbf{x}^c) \leq h_{i_2}, \quad i_2 = 1, 2, \dots, n_2$ $\underline{w}_{i_3} \leq w_{i_3}(\mathbf{x}^c) \leq \bar{w}_{i_3}, \quad i_3 = 1, 2, \dots, n_3$	warunki brzegowe dla zadanych funkcji zmiennych decyzyjnych

Strategie ewolucyjne [4] działają na populacjach złożonych z osobników reprezentowanych przez chromosomy (stanowiące zbiory dyskretnych wartości m parametrów typu przedmiotowego x_i^c reprezentujących zmienne decyzyjne sformułowanej funkcji celu $F_{object}(\mathbf{x}^c)$ i odpowiadających im dyskretnych wartości m parametrów typu strategicznego σ_i^c , które stanowią odchylenia standardowe zmiennych decyzyjnych x_i^c):

$$\text{Chromosom: } \langle x_1^c, x_2^c, \dots, x_i^c, \dots, x_m^c; \sigma_1^c, \sigma_2^c, \dots, \sigma_i^c, \dots, \sigma_m^c \rangle$$

wraz ze wskaźnikami ich przystosowania (tj. wartościami przyjętej funkcji celu). Należy podkreślić, że osobniki istnieją jedynie w dyskretnych punktach, które są rozmieszczone w regularnych odstępach w przestrzeni m -wymiarowej reprezentującej dziedzinę ich wartości.

Działanie algorytmu genetycznego zaczyna się od reprodukcji. Wygenerowani osobnicy, tworzący populację, są wybierani według ich kondycji do produkcji potomków. Najlepsi z nich zwiększają swoją reprezentację, średni mogą przetrwać, a najgorsi wymierają. Wariant strategii ewolucyjnej typu $(\mu^* + \lambda^*)$ -ES został zastosowany podczas poszukiwania optymalnego zestawu zmiennych decyzyjnych. Symbol $(\mu^* + \lambda^*)$ oznacza, że podczas tworzenia następnej generacji w wyniku procesu selekcji bierze udział pula μ^* osobników reprezentujących rodziców łącznie z pulą λ^* osobników reprezentujących ich potomstwo. Wykreowane potomstwo może ulec mutacji w wyniku losowej zmiany materiału genetycznego wybranego osobnika. Mutacja polega na sporadycznej zmianie, która jest zdeterminowana przez wektor parametrów strategicznych σ^c . Jest ona realizowana w następujący sposób:

$$\sigma_i^c = \sigma_i^c \cdot \exp[\tau \cdot N(0,1) + \tau' \cdot N_i(0,1)] \quad (5)$$

$$x_i^c = x_i^c + \sigma_i^c \cdot N(0,1) \quad (6)$$

gdzie $N(0,1)$ jest funkcją rozkładu normalnego jednowymiarowej zmiennej o wartości średniej równej zeru i standardowym odchyleniu wynoszącym jeden (tj. standardową zmienną losową rozkładu Gaussa), $N_i(0,1)$ jest standardową zmienną losową rozkładu Gaussa przyporządkowaną i -temu wymiarowi. Symbole τ i τ' reprezentują stałe, które determinują wielkość zmiany materiału genetycznego poszczególnych osobników populacji. Często przyjmuje się, że τ jest proporcjonalne do (lub równe) $1/\sqrt{2m}$, natomiast τ' jest proporcjonalne do (lub równe) $1/\sqrt{2\sqrt{m}}$. Po zakończeniu pierwszej tury reprodukcji, krzyżowania i mutacji, nowe pokolenie osobników musi zostać poddane ocenie. W kolejnych turach operacji genetycznych następuje dalsza poprawa wyników pod względem przystosowania rozpatrywanej populacji aż do chwili, gdy kryteria wyrażone poprzez funkcję celu zostaną spełnione – umożliwiając w ten sposób uzyskanie aproksymacji poszukiwanego rozwiązania.

Podczas poszukiwania optymalnego rozwiązania funkcji celu zastosowano strategię ewolucyjną wykorzystującą selekcje lokalne w obrębie nisz dla małych populacji lokalnych zamiast przeprowadzać selekcję globalną dla całej jednej populacji złożonej z dużej liczby osobników, którzy są reprezentowani przez chromosomy. Zastosowana procedura główna strategii ewolucyjnej wykorzystującej selekcje lokalne w obrębie nisz jest przedstawiona w zwięzły sposób za pomocą następującego kodu komputerowego:

Procedura Główna:

```

t = 0;
InitializeNiche(i)  $\forall i \in N$ ;
InitializeParameters ( );
Evaluate[Niche(i,0)]  $\forall i \in N$ ;
While(Not End)
  NicheEvolution(i,t)  $\forall i \in N$ ;
  At Certain Interval
    NicheCompete ( )
    GeneFlow ( )
  t = t + 1;
End

```

Z kolei procesy ewolucji zachodzące w każdej z niszy i obejmujące operacje mutacji i selekcji są określone w następujący sposób:

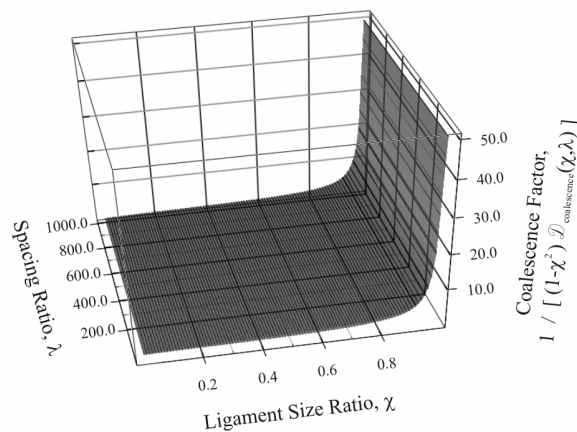
Procesy Ewolucji w Niszy:

```

NicheEvolution(i,t)
  Niche'(i,t) = Mutate[Niche(i,t)];
  Evaluate[Niche'(i,t)];
  Niche(i,t+1) = Select[Niche(i,t)  $\cup$  Niche'(i,t)];
End

```

Funkcja celu poszukiwań ewolucyjnych została zbudowana przy wykorzystaniu współczynnika określającego możliwość wystąpienia koalescencji drugiej postaci w materiale porowatym, którego wartości są przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Współczynnik określający możliwość wystąpienia koalescencji drugiej postaci jako funkcja współczynnika proporcji wymiarów dla reprezentatywnej objętości pora λ i wymiaru wiązadła χ

Dla tego typu funkcji celu nie jest efektywne zastosowanie wcześniej rozważanej metody ograniczonego sympleksu. Podstawowym parametrem określającym możliwość wystąpienia szkodliwego zjawiska koalescencji w strukturze porowatej jest wymiar jej wiązadła χ . Uzyskane wyniki poszukiwań przy wykorzystaniu strategii ewolucyjnej są spójne i porównywalne z analizą teoretyczną przeprowadzoną przez Gibsona i Ashby'ego [3].

6. PODSUMOWANIE

- Podstawowym parametrem, który określa możliwość wystąpienia szkodliwego zjawiska koalescencji w strukturze porowatej jest wymiar jej wiązadła χ . Dla materiałów porowatych, w których cylindryczne pustki są uporządkowane w jednym kierunku, wartość tego parametru powinna spełniać następującą relację: $\chi < 0,8$.
- Wyniki obliczeń pokazują, że ewolucyjna strategia wykorzystująca selekcje lokalne w obrębie nisz umożliwia określenie globalnego minimum i minimum lokalnych funkcji celu.
- Nowa metoda wytwarzania metalicznych materiałów porowatych jest odpowiednia do produkcji nowej klasy materiałów, które są określane jako materiały funkcjonalnie gradientowe.

LITERATURA

- [1] Banhart J., 2001. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Prog. Mater. Sci.* 46, 559-632.
- [2] Chino Y., Mabuchi M., Sassa K., Asai S., 2006. Processing and mechanical properties of a porous low carbon steel with a controlled porous structure by imposition of a static magnetic field. *Mat. Sci. Eng. A* 417, 281-286.
- [3] Gibson L.J., Ashby M.F., 1988. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Pergamon Press, Oxford.
- [4] Goldberg D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley. Reading, MA.
- [5] Gologanu M., Leblond J.B., Perrin G., Devaux J., 1997. Recent extensions of Gurson's model for porous ductile metals. [In:] *Continuum Micromechanics*. Suquet P. (Ed.) Springer (CISM Lectures Series), New York, 61-130.
- [6] Thomason P.F., 1985. Three-dimensional models for the plastic limit-loads at incipient failure of the intervoid matrix in ductile porous solids. *Acta Metall.* 33, 1079-1085.

OPTIMIZATION OF THE PERFORMANCE OF POROUS LOW CARBON STEELS BY MEANS OF A GENETIC ALGORITHM

Summary

Possibilities for manufacturing cellular metallic materials are reviewed. However, this study primarily concerns the role of a cell wall structure in influencing the mechanical behavior of metallic foams. A porous low carbon steel with a controlled porous structure is processed from spark plasma sintering of ferromagnetic metal segments with a special, elongated shape. The ferromagnetic metal segments are filled into a die-block and their orientation is settled by a static magnetic field. The cell wall structures of the porous low carbon steel can be modify in order to improve its performance because differences in the cell wall structure affect the mechanisms of deformation and failure under different types of loading substantially. The optimal shape of the structure following the required macroscopic mechanical response is established by means of the search scheme of an evolution strategy.

Key words: cellular metallic materials, evolution strategies, extended Gurson model, spark plasma sintering