

**Andrzej Marek Zacharski\***

**Andrzej Zygmunt Zacharski \*\***

## **WSPOMAGANIE KOMPUTEROWE W PROJEKTOWANIU ŚCIAN OSŁONOWYCH Z UWAGI NA WYMAGANIA OCHRONY CIEPLNEJ**

Poprawne zaprojektowanie ściany osłonowej ze szkieletem metalowym pod kątem spełniania wymagań ochrony cieplnej nie jest łatwe i często wymaga dokonywania korekt w pierwotnym rozwiązaniu projektowym. W artykule przedstawiono sposób poprawiania izolacyjności cieplnej lekkich ścian osłonowych metodą remodelowania adaptacyjnego. Zastosowano algorytm wyrównywania energii cieplnej lub gęstości strumienia. Artykuł zawiera przykłady zmniejszania współczynnika przenikania ciepła: złącza punktowego płyty warstwowej oraz profilu fasady strukturalnej.

### **1. Wstęp**

Remodelowanie adaptacyjne jest elementem składowym tworzonej w ostatnim dziesięcioleciu nowej gałęzi nauki nazywanej „Computer Aided Optimal Design” (w skrócie CAOD). Jest to jedna z najefektywniejszych metod komputerowego projektowania konstrukcji przez tworzenie topologii optymalnych w sensie optymalnego wypełnienia przestrzeni materiałem. Wiele z algorytmów wspomagających tę metodę zyskało już szerokie zastosowanie praktyczne, na przykład przez zintegrowanie systemów MES z oprogramowaniem optymalizacyjnym oraz CAD. Narodziny nowej dziedziny nauki o nazwie „Computer Aided Optimal Design” datuje się od konferencji NATO w Troi [1].

W naszym przypadku miarą globalną poprawności konstrukcji staje się możliwie jednorodny rozkład uogólnionej energii cieplnej w elementach konstrukcyjnych (np. ilości energii lub gęstości strumienia cieplnego). W pierwszym analizowanym przykładzie złącza punktowego płyty warstwowej miarą globalną jest ilość energii cieplnej, w drugim gęstość strumienia cieplnego. Właściwy wybór miary globalnej ułatwia wykrycie obszarów o złej izolacyjności cieplnej. Proponowany algorytm remodelowania adaptacyjnego zastosowano do polepszenia jakości konstrukcji przez poprawianie jej wybranych fragmentów. Wyboru podobszarów remodelowanych dokonuje się po wstępnej analizie MES i konsultacji z projektantem.

---

\* dr inż. – adiunkt w ITB

\*\*mgr fizyki – st. specjalista w ITB

## 2. Algorytm remodelowania adaptacyjnego

Właściwą energię cieplną przypadającą na jednostkową zmienną decyzyjną w obszarze dyskretnym  $U\Omega_i$  po kolejnym kroku iteracyjnego remodelowania definiuje funkcja jakości:

$$\Phi = \sum_1^{NE} \left( E_i^{k+1} H_i^{k+1} - E_i^k H_i^k \right) \quad (1)$$

dla  $\Omega \cup_1^{NE} \Omega_i$ , w której  $i \in (1, NE)$  jest numerem elementu skończonego,  $k$  jest numerem iteracji, natomiast  $NE$  oznacza całkowitą liczbę elementów skończonych, na jakie podzielono model obliczeniowy. Ponadto w definicji (1) wprowadzono oznaczenia:  $E_i$  jest wartością energii cieplnej w  $i$ -tym elemencie, natomiast  $H_i$  wartością zmiennej projektowej w tym elemencie. Funkcja (1) posłuży do oceny kolejnych iteracji – jej znak świadczy o tym, czy konstrukcja przy przejściu z  $k$ -tej iteracji do  $k + 1$  iteracji została polepszona, czy nie.

Dla równania konstytuującego proces remodelowania:

$$H_i^{k+1} = \frac{E_i^k H_i^k}{\alpha} \quad (2)$$

zapisano tożsamość:

$$\sum_1^{NE} \left( \alpha H_i^{k+1} - E_i^k \right) = 0 \quad (3)$$

W zależnościach (2) i (3) występuje mnożnik  $\alpha$ , który ma wymiar energii cieplnej ( $\alpha \in R$ ,  $\alpha E_{\max}$  dla  $E_{\max} = \sup E_i^k$   $i \in [1, NE]$ ,  $k$  – numer iteracji).

Podstawiając tożsamość (3) do definicji (1) oraz wykorzystując definicję stałej  $\alpha$  otrzymano:

$$\sum_1^{NE} \left( E_i^{k+1} - \alpha \right) H_i^{k+1} \leq 0 \quad (4)$$

co prowadzi do nierówności:

$$E^{k+1} = \sum_1^{NE} E_i^{k+1} \leq E^0 \quad (5)$$

w której  $E^0$  oznacza kres górny sumarycznej energii cieplnej w konstrukcji.

Jak widać, zaproponowany algorytm według prawa remodelowania (2) prowadzi do poprawy konstrukcji w kolejnych krokach iteracji rys. 1).

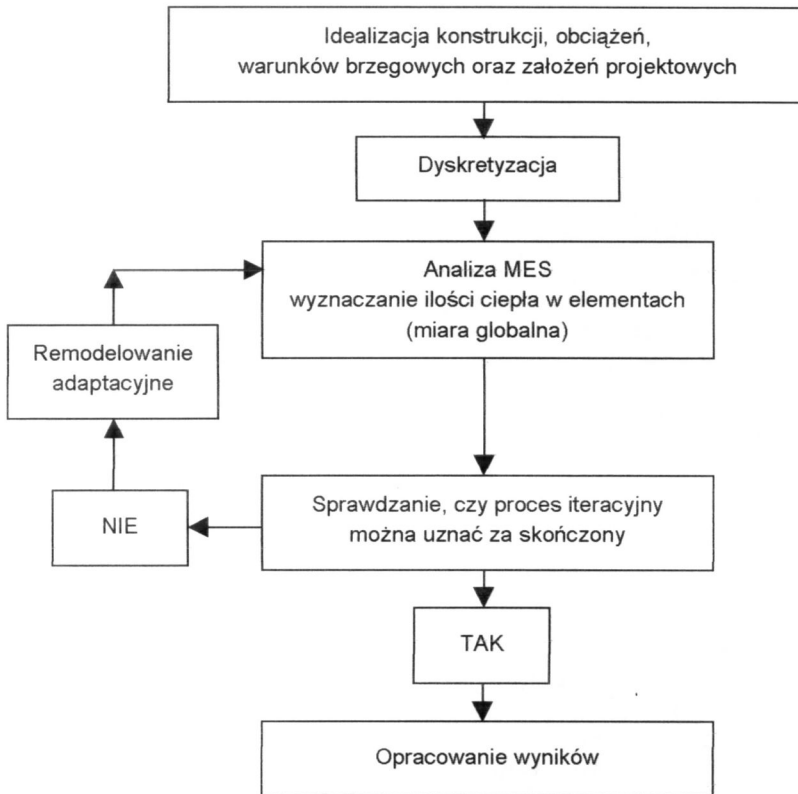
W przypadku remodelowania według zależności (2) konstrukcji o dobrze uwarunkowanej globalnej macierzy przewodzenia zachodzą związki:

$$\frac{\partial E^{k+1}}{\partial H_{\max}} > 0, \quad \frac{\partial E^{k+1}}{\partial \alpha} > 0, \quad (H_{\max} = \sup H_i \text{ dla } i \in [1, NE]) \quad (6)$$

Pierwsza z powyższych nierówności jest słuszna w przypadku, gdy zmienną decyzyjną jest współczynnik przewodzenia ciepła. W przypadku ogólnym znak tej nierówności należy określać na podstawie analizy wrażliwości.

Stosując się do zależności (6), już w trakcie remodelowania (przed analizą MES-owską)

dobieramy  $\alpha$  tak, by spełnić warunek  $\sum_1^{NE} E_i^{k+1} \leq (1 - \varepsilon) E^0$ , gdzie  $\varepsilon$  jest dowolnie małe.



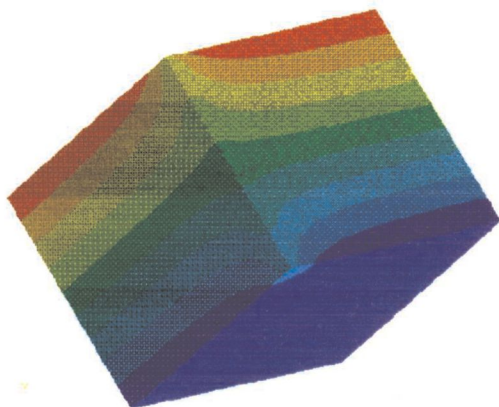
Rys. 1. Algorytm remodelowania adaptacyjnego  
Fig.1 Algorithm of adaptive remodelling

Zagadnienie poprawnie wybranych własności konstrukcji jest zagadnieniem interdyscyplinarnym, stąd wprowadzono dodatkowe ograniczenie (na ogół sprzeczne z wymaganiami wytrzymałościowymi i odporności ogniowej), które zawęży obszar remodelowania do podobszarów, w których  $E_i^k \geq E^*$  dla  $E^* = \beta E_{\max}$  oraz  $\beta \in (0,1)$ . Zmiany te nie powodują utraty wymagań sztywnościowo-wytrzymałościowych, odporności ogniowej i trwałości.

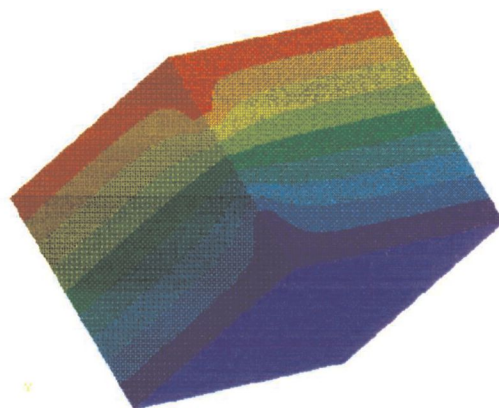
### 3. Przykłady

Procesowi remodelowania poddano konstrukcję wycinka 1/4 połączenia płyty. Przyjmując jako zmienną projektową współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ , wymieniony fragment konstrukcji poddano przemodelowaniu. Zmniejszeniu współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  towarzyszyło zmniejszenie punkowego współczynnika przenikania ciepła  $\chi$ .

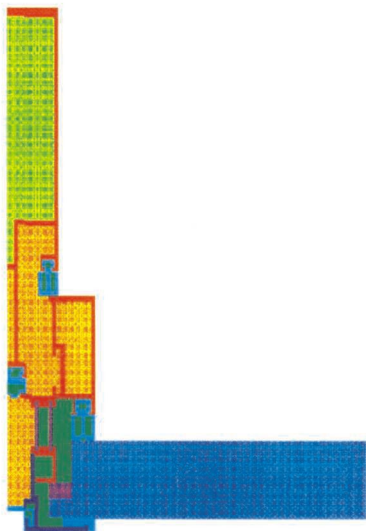
Część środkową śruby zastąpiono przekładką termiczną (pozostałe części niezbędne wytrzymałościowo i ze względu na odporność ogniową). W wyniku przemodelowania zniknął obszar o zwiększonej energii  $E$  w środkowej części śruby. Na rysunkach 2 i 3 pokazano rozkład temperatury przed i po remodelowaniu.



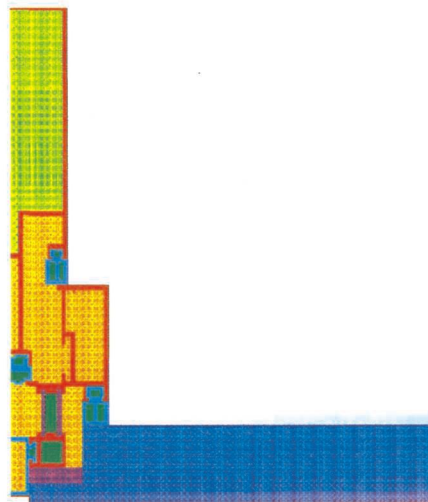
Rys. 2. Temperatura przed remodelowaniem  
Fig. 2. Temperature before remodelling



Rys. 3. Temperatura po remodelowaniu  
Fig. 3. Temperature after remodelling



Rys. 4. Struktura przed remodelowaniem  
Fig. 4. Structure before adaptive remodelling



Rys. 5. Struktura po remodelowaniu  
Fig. 5. Structure after adaptive remodelling

W drugim przykładzie procesowi remodelowania poddano konstrukcję półstrukturalnej ściany osłonowej pokazanej na rysunku 4. Gęstość strumienia ciepłego we fragmencie zaznaczonym na rysunku 4 kolorem ciemnoniebieskim jest wyższa od górnego ograniczenia na skali kolorów. Przyjmując jako zmienną projektową współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ , wyszczególniony fragment konstrukcji poddano przemodelowaniu. Zmniejszeniu współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  towarzyszyło zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła  $U_r$  ramy.

Przykładowo:

- aluminium  $\lambda = 200 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) - U_r = 3,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,
- stal konstrukcyjna  $\lambda = 56 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) - U_r = 2,9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,
- stal nierdzewna  $\lambda = 17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) - U_r = 2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,
- PCW  $\lambda = 0,17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) - U_r = 2,75 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Skasowanie wyróżnionego na rysunku 4 elementu konstrukcyjnego i przejście na ścianę osłonową w pełni strukturalną (rys. 5) pozwala na obniżenie  $U_r$  do około  $1,7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

## 4. Wnioski

W prosty sposób, poprzez filtrowanie wartości liczbowych energii cieplnej lub gęstości strumienia ciepłego są wyznaczane podobszary konstrukcji odpowiedzialne za jej złą izolacyjność. Lokalizacja takich podobszarów pozwala na remodelowanie polepszające jakość konstrukcji lub na podjęcie wspólnie z projektantem decyzji o dalszym jej losie.

## Bibliografia

- [1] Preprints NATO/NASA/NSF/USAF Conf. Computer Aided Optimal Design, Troia, Portugal, 1986
- [2] ANSYS/Professional Packet, the Program of Advanced Analysis Techniques, ANSYS, Inc., Canonsburg, USA

### COMPUTER AIDED DESIGN OF ENERGY EFFICIENT LIGHT WEIGHT EXTERNAL ENVELOPES

#### Summary

The paper deals with the problem of external envelopes thermal insulation adaptive improvement. The algorithm of thermal energy or thermal flux density equalisation has been applied. The paper is illustrated with examples of diminishing the thermal transmittance coefficient for sandwich slab with local joints and for structural fasade profile.

*Praca wpłynęła do Redakcji 22 II 2001*