

## NAPRĘŻENIA WŁASNE TERMICZNE W SPAJANYCH ELEMENTACH CERAMIKI AlN Z MIEDZIĄ

Dariusz Kaliński<sup>1)</sup>, Wiesława Olesińska<sup>1)</sup>

Przedstawiono niektóre wyniki numerycznej analizy (MES) - metoda elementów skończonych naprężeń własnych w podłożach Cu-AlN otrzymywanych metodą spajania bezpośredniego. Obliczenia przeprowadzono w układzie symetrycznym Cu-AlN-Cu i asymetrycznym Cu-AlN, dla typowych grubości materiałów stosowanych w tego typu modułach. Podłoża takie wykorzystuje się do montażu struktur półprzewodnikowych w elektronice i optoelektronice. Można je otrzymać metodą (CDB) - metoda spajania bezpośredniego, bądź techniką lutowania ceramiki metalizowanej z płytkami miedzianymi.

Jednym z ważniejszych problemów w praktyce produkcyjnej i eksploatacyjnej tego typu ceramiczno-metalowych modułów (podłoży) jest generowanie się w nich naprężeń własnych termicznych powodujących odkształcanie podłoży wynikających m.in. z różnicy właściwości łączonych materiałów. Znajomość wielkości i rozkładu naprężeń własnych umożliwia dobór parametrów konstrukcyjnych układów wolnych od naprężeń.

### 1. WPROWADZENIE

Materiały ceramiczne takie jak np. AlN, SiC czy BeO charakteryzują się między innymi wysokim przewodnictwem cieplnym oraz niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Cechy te nabierają szczególnego znaczenia dla materiałów stosowanych w układach elektronicznych i optoelektronicznych (podłoża, obudowy), w których wydzielanie ciepła może zakłócić pracę układu. Ceramika z azotku glinu AlN oprócz wysokiego przewodnictwa cieplnego ( $\sim 200$  W/mK) charakteryzuje się współczynnikiem rozszerzalności cieplnej  $\alpha$  ( $3,5 - 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) bardzo bliskim współczynnikowi  $\alpha$  dla np. GaAs, jednemu z podstawowych materiałów stosowanych do wytwarzania laserów półprzewodnikowych.

Dla niektórych zastosowań, w celu osiągnięcia wysokiej przewodności cieplnej można zastosować dobrze zespolone układy Cu-AlN. Wykorzystuje się je m.in. na podłoża do

---

<sup>1)</sup> Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133  
e-mail: olesin-w@sp.itme.edu.pl

montażu struktur półprzewodnikowych w elektronice jak i optoelektronice<sup>2</sup>. Układy takie, o budowie warstwowej składające się z ceramiki AlN i miedzi, otrzymać można metodą CDB, bądź techniką lutowania ceramiki metalizowanej z płytkami miedzianymi [1-2].

Jednym z ważniejszych problemów w praktyce produkcyjnej i eksploatacyjnej tego typu ceramiczno-metalowych (c-m) modułów jest generowanie się w nich naprężeń własnych. Powstają one podczas chłodzenia połączenia od temperatury spajania (w przypadku np. lutowania jest to temperatura krzepnięcia spoiwa) do temperatury otoczenia, w której osiągają największą wartość. Na wielkość i rozkład naprężeń własnych w połączeniach c-m największy wpływ wywiera różnica współczynników rozszerzalności cieplnej ceramiki ( $\alpha_c$ ) i metalu ( $\alpha_m$ ). Różnica współczynników  $\alpha_c$  i  $\alpha_m$  powoduje, że podczas swobodnego chłodzenia złącza (od temperatury spajania), materiały tworzące je odkształcają się nierównomiernie. Tym odkształceniom - sprężystym w ceramice (przyjmujemy, że w ceramice występują tylko odkształcenia sprężyste) oraz odkształceniom sprężystym i plastycznym w metalu, towarzyszy zróżnicowany w obu składnikach złącza skurcz. Wywołuje on w strefie spajania, siły i momenty gnące, które narastają ze spadkiem temperatury. Wysoki poziom rozciągających naprężeń własnych, powiązany z małą wytrzymałością mechaniczną (niska odporność na pęknięcie - charakterystyczna dla kruchych materiałów) tworzywa ceramicznego, prowadzi do pęknięcia ceramiki, a co za tym idzie zniszczenia ceramiczno-metalowego połączenia. Oprócz zróżnicowania współczynników  $\alpha$  ceramiki i metalu, na stan naprężeń własnych mają również wpływ: moduły sprężystości wzdłużnej (E) ceramiki i metalu, granica plastyczności metalu (Re), umocnienie oraz prędkość chłodzenia złącza, jeśli powoduje gradient temperatury w łączonych elementach [3-4]. Znaczną rolę odgrywają także czynniki geometryczne, a więc kształt i wymiary spajanych elementów [5-6].

Jak zaznaczono powyżej, moduły Cu-AlN stosuje się jako podłoża do montażu struktur półprzewodnikowych. Ważnym zagadnieniem przy spajaniu struktury do podłoża jest otrzymanie układu o możliwie małych naprężeniach własnych. W przypadku zastosowania podłoża Cu-AlN stan naprężeń w układzie: półprzewodnik - podłoże wynikać może nie tylko z różnicy właściwości łączonych materiałów, ale także z naprężeń własnych wygenerowanych w czasie procesu otrzymywania modułu Cu-AlN.

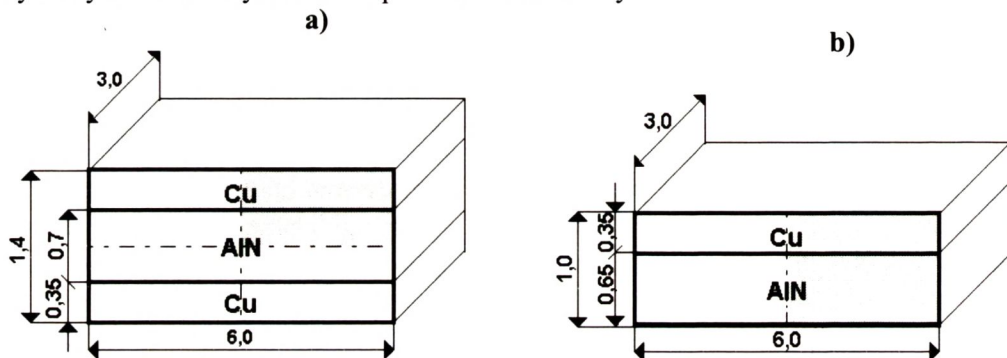
---

<sup>2)</sup> W ramach grantu KBN (nr 7 T08C 019 17) pt. "Badania nad zastosowaniem kompozytów w technologii chłodnic laserowych" prowadzone są m.in. prace nad zastosowaniem modułu Cu-AlN-Cu jako odbiornika ciepła do laserów półprzewodnikowych.

## 1. ANALIZA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W SPAJANYCH UKŁADACH AlN Z MIEDZIĄ

### 1.1. Przedmiot analizy

Przedmiotem analizy numerycznej naprężeń własnych były modele podłoży warstwowych, składających się z ceramiki azotkowej AlN i miedzi. Jak już zaznaczono układy takie, otrzymać można m.in. metodą *CDB* - *direct bonding* (bez metalicznych warstw pośrednich na ceramicie) bądź techniką lutowania metalizowanej ceramiki z miedzianymi okładkami<sup>3)</sup>. Obliczenia przeprowadzono w układzie symetrycznym Cu-AlN-Cu i asymetrycznym Cu-AlN, dla typowych grubości materiałów stosowanych w tego typu podłożach, bez metalicznych warstw pośrednich na ceramicie. Kształt oraz wymiary analizowanych modeli przedstawiono na Rys. 1.



**Rys. 1.** Modele podłoży Cu-AlN przyjęte do analizy numerycznej naprężeń własnych; a) symetryczny Cu-AlN-Cu, b) asymetryczny Cu-AlN.

**Fig. 1.** Models of Cu-AlN substrates used in finite element calculations of thermal residual stresses; a) symmetric Cu-AlN-Cu, b) asymmetric Cu-AlN.

### 1.2. Metoda i założenia do obliczeń naprężeń własnych

Obliczenia rozkładu i poziomu naprężeń własnych termicznych wykonano metodą elementów skończonych przy użyciu pakietu FEA "LUSAS"<sup>4)</sup>.

Analizę numeryczną stanu naprężeń w badanych modelach podłoży przeprowadzono przy następujących założeniach:

<sup>3)</sup> Z punktu widzenia zapewnienia wysokiego przewodnictwa cieplnego modułu Cu-AlN-Cu korzystniejsze jest zastosowanie do jego otrzymania spajania bezpośredniego. W lutowanym układzie przekazywanie ciepła zakłócanie jest przez dodatkowe warstwy (metalizacja, lut) o znacznie zróżnicowanym przewodnictwie cieplnym.

<sup>4)</sup> Obliczenia przeprowadzono w Zakładzie Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej

- materiały w przyjętej analizie wykazują właściwości izotropowe,
- w analizowanych materiałach zachodzą zjawiska w zakresie termo- sprężysto- plastycznym,
- odkształcenia w materiałach opisywane są zależnościami z zakresu liniowej teorii sprężystości i małych odkształceń plastycznych,
- właściwości materiałów (Tab. 1) przyjęte w analizie (współczynnik rozszerzalności cieplnej  $\alpha$ , moduł Younga E, granica plastyczności Re) poza stałą Poissona  $\nu$  są liniową lub kwadratową funkcją temperatury,
- zachowanie plastyczne materiału opisano równaniami teorii plastycznego płynięcia, przyjmując warunek plastyczności Hubera-Mises'a,
- założono, że nie występuje gradient temperatury w spajanych materiałach.

**Tabela 1.** Właściwości ceramiki AlN\*) i Cu przyjęte do obliczeń numerycznych naprężeń własnych termicznych.

**Table 1.** Materials data of the components (AlN and Cu) for calculation of thermal residual stresses.

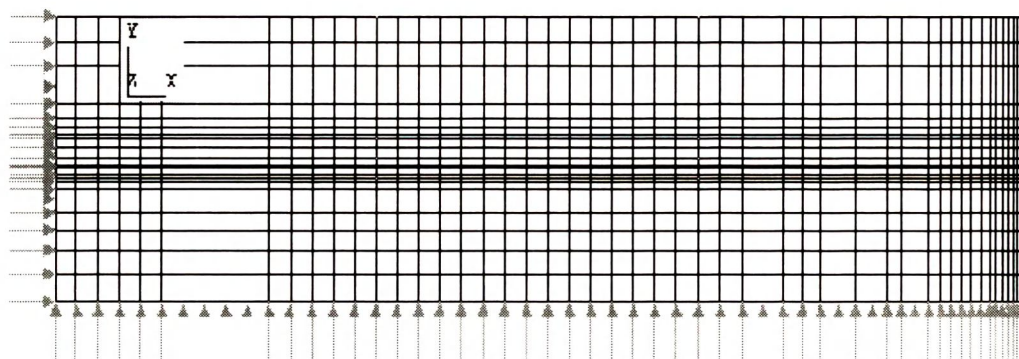
\*) Dane wg producenta "NEWMET KOCH" New Metals & Chemicals Limited, Anglia.

Materiał	WRC $\alpha$ (*10 <sup>-6</sup> 1/K)	Moduł Younga E (GPa)	Granica plastyczności Re (MPa)	Stała Poissona $\nu$
Cu (293 K)	16,5	131,5	50,0	0,345
(1003 K)	19,10	70,2	17,1	0,345
AlN (293-573 K)	4,5	310,0	-	0,237

Zadanie, z uwagi na swoją nieliniowość, rozwiązywane jest w sposób przyrostowy na drodze iteracji. W przypadku podłoża symetrycznego Cu-AlN-Cu, z uwagi na podwójną symetrię osiową (x,y), do analizy przyjęto tylko ćwiartkę założonego modelu. W przypadku podłoża asymetrycznego obliczenia przeprowadzono dla połowy założonego modelu (symetria względem osi y). Na Rys. 2 przedstawiono przykładową siatkę elementów skończonych (dla płaskiego stanu naprężenia) na jakie podzielony został model podłoża symetrycznego Cu-AlN-Cu. Składa się ona z 1320 elementów prostokątnych połączonych ze sobą w 1400 węzłach. Siatka została zagęszczona w obszarze spodziewanej koncentracji naprężeń w ceramice tj. przy zewnętrznej krawędzi elementu ceramicznego oraz w pobliżu linii połączenia ceramika/ miedź.

Warunki obciążenia modeli podłoży wynikają z procesu ich otrzymywania. Przyjęto, że naprężenia własne generowane są w podłożach w czasie ich chłodzenia od temperatury 1333 K do temperatury otoczenia 293 K. Oznacza to, że określone naprężenia "odpowiadałyby" powstałym w trakcie spajania ceramiki AlN z miedzią

tak jak w metodzie *CDB*<sup>5)</sup> (bez metalicznych warstw pośrednich na ceramice). Z uwagi na nieliniowy charakter zmiany właściwości materiałów przy obniżaniu temperatury cały jej zakres podzielony został na 18 kroków temperaturowych, a analizę prowadzono na drodze przyrostowego obliczania naprężeń w poszczególnych krokach temperaturowych. Dokładność obliczeń wynosiła 0,1.



**Rys. 2.** Siatka elementów skończonych dla symetrycznego modelu podłoża Cu-AlN-Cu przyjętego do analizy numerycznej naprężeń własnych.

**Fig. 2.** Example of the finite element mesh used during FEM calculations. (Cu-AlN-Cu substrate).

### 1.3. Wyniki numerycznych obliczeń naprężeń własnych termicznych

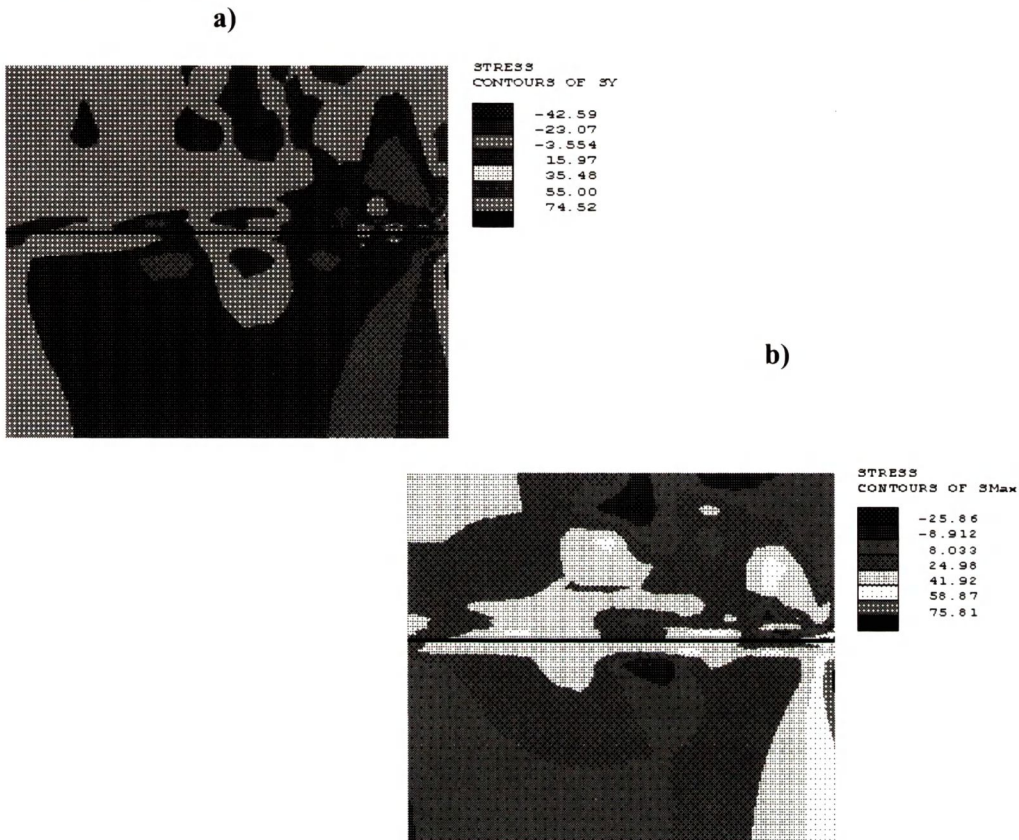
W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano mapy rozkładu naprężeń własnych termicznych oraz liczbowe wartości naprężeń w środkach ciężkości elementów. Program umożliwił otrzymanie wyników dla następujących składowych stanu naprężenia: naprężenie osiowe  $\sigma_y$  ( $S_y$ ), naprężenie  $\sigma_x$  ( $S_x$ ), naprężenie styczne  $\tau_{xy}$  ( $S_{xy}$ ), naprężenie główne maksymalne  $\sigma_{MAX}$  ( $S_{max}$ ), naprężenie główne minimalne  $\sigma_{MIN}$  ( $S_{min}$ ). Ponadto uzyskano wartości przemieszczeń oraz składowej plastycznej odkształcenia dla węzłów siatki.

Do analizy niezawodności pracy konstrukcji (materiału, połączenia) przyjęto zalecaną dla materiałów kruchych (ceramika, beton, szkło itp.) hipotezę wytrzymałościową Mohr'a [4,5,7] wg której można przyjąć, że o wytrzymałości połączenia decydują największe

<sup>5)</sup> Technika *CDB* - *direct bonding* polega na łączeniu miedzi z ceramiką przez eutektykę Cu-Cu<sub>2</sub>O lub stop bliskoeutektyczny, który tworzy się na powierzchni miedzi w temperaturze ~ 1338 K w obecności nieznacznej ilości tlenu (0,39%) [1].

sze naprężenia rozciągające występujące w ceramice  $\sigma_{MAX}^{6)}$ . (Naprężenia w metalu nie są niebezpieczne, z uwagi na jego wysoką z reguły plastyczność.)

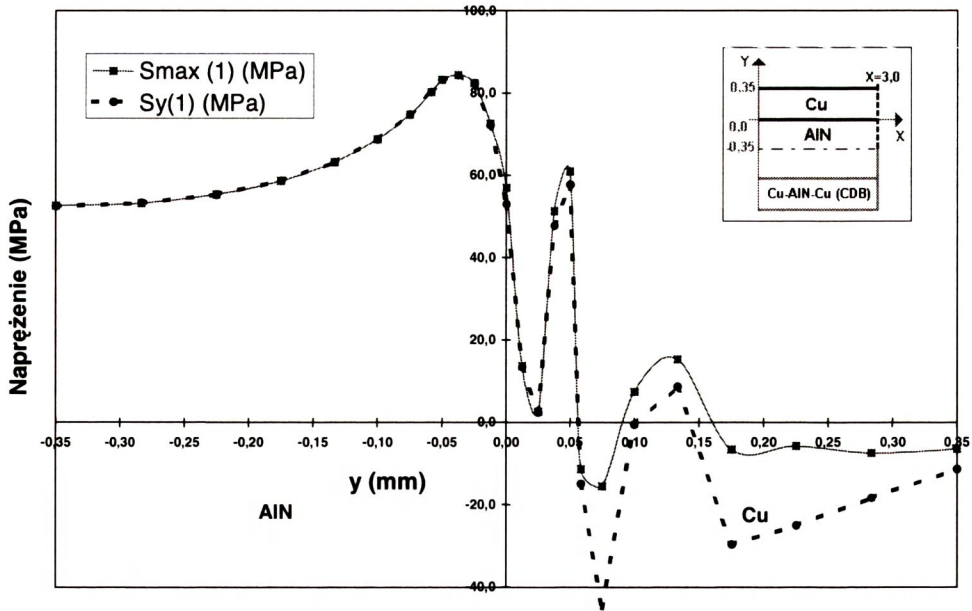
Numeryczne obliczenia naprężenia głównego maksymalnego  $S_{max}$  bądź też równoważnej mu składowej naprężenia osiowego  $S_y$  (Rys. 3, 4) wykazały, że w analizowanych modelach podłoża: symetrycznym Cu-AlN-Cu i asymetrycznym Cu-AlN, otrzymywanych metodą CDB, największe spiętrzenie naprężeń występuje w tym samym obszarze złącza.



**Rys. 3.** Przykładowe mapy rozkładów naprężeń: a)  $\sigma_y(Sy)$ , b)  $\sigma_{MAX}(Smax)$ ; w modelu podłoża Cu-AlN-Cu (spajanego metodą CDB) ( $x= 2,5$  do  $3,0$  mm).

**Fig. 3.** Distribution of a) normal stress  $\sigma_y(Sy)$ , b) principle stress  $\sigma_{MAX}(Smax)$ ; in Cu-AlN-Cu substrate produced using CDB method. ( $x= 2,5$  do  $3,0$  mm).

<sup>6)</sup> W analizie niezawodności płaskich (doczołowych) połączeń ceramika - metal zamiast naprężeniem głównym maksymalnym  $\sigma_{MAX}$ , można posługiwać się równoważną mu składową naprężenia osiowego  $\sigma_y$  [3,4,5]. Ma to szczególne znaczenie przy analizach eksperymentalnych, gdyż składową  $\sigma_y$  można stosunkowo łatwo mierzyć i na tej podstawie wnioskować o wyężeniu w próbce.

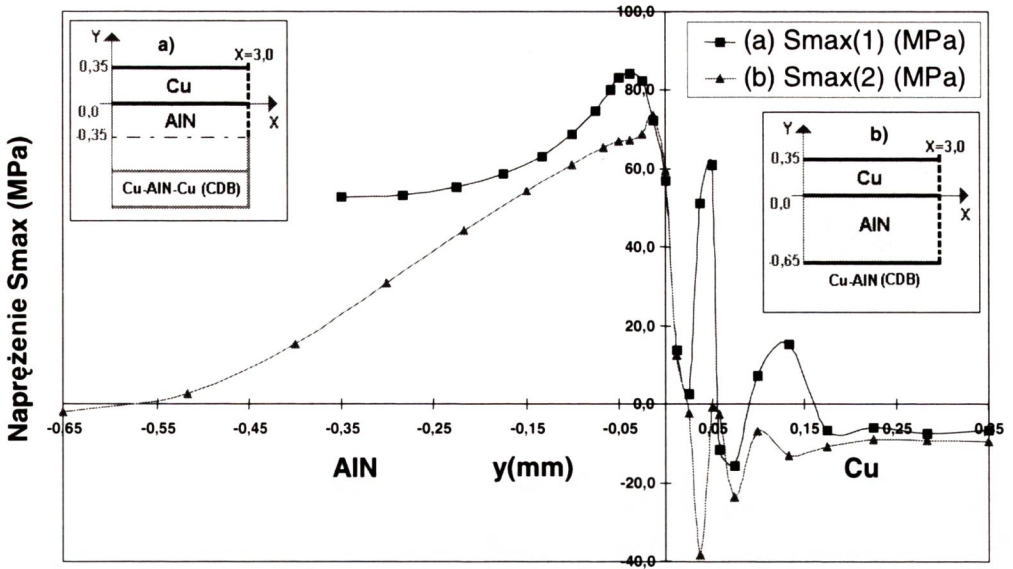


Rys. 4. Porównanie przebiegu zmian naprężenia głównego maksymalnego  $S_{max} (1)$  i naprężenia osiowego  $S_y$  (wzdłuż osi  $y$  dla  $x = 3,0$  mm) w modelu podłoża Cu-AlN-Cu.

Fig. 4. The comparison of residual principle stress  $\sigma_{MAX}$ -  $S_{max} (1)$  and normal stress  $\sigma_y$ -  $S_y$  in Cu-AlN-Cu substrate; (along  $y$ -axis for  $x = 3.0$  mm).

Maksymalne dodatnie (rozciągające) naprężenia  $S_{max}$  (Rys. 5) czy  $S_y$  (Rys. 6) występują w elemencie ceramicznym w niewielkiej odległości od linii spojenia (ceramika/miedź) na powierzchni zewnętrznej badanych modeli. Miejsce to jest obszarem największej koncentracji naprężenia w ceramice co oznacza, że jeśli naprężenia przekroczą tam dopuszczalną wartość wytrzymałości ceramiki na rozciąganie to istnieje duże prawdopodobieństwo, że właśnie w tym obszarze pojawi się pęknięcie i zapoczątkowany zostanie proces jego rozchodzenia się w materiale.

W symetrycznym modelu podłoża (Cu-AlN-Cu) naprężenie główne maksymalne  $S_{max}$  osiągnęło najwyższą wartość 84,2 MPa w punkcie o współrzędnych  $x = 3,0$  mm i  $y = -0,0375$  mm (Rys. 4, 5). W przypadku modelu asymetrycznego Cu-AlN ekstremalna wartość naprężenia  $S_{max}$ , w tym samym obszarze, wynosiła 73,5 MPa (Rys. 5). W analizowanym obszarze połączenia naprężenia osiowe  $S_y$  osiągnęły zbliżone wartości (Rys. 4). Na uwagę zasługuje interesujący przebieg zmian wartości analizowanych naprężeń w modelu podłoża Cu-AlN-Cu. Podłoże to charakteryzuje się prawie symetrycznym rozkładem naprężeń względem połowy wysokości elementu ceramicznego (Rys. 4, 5).

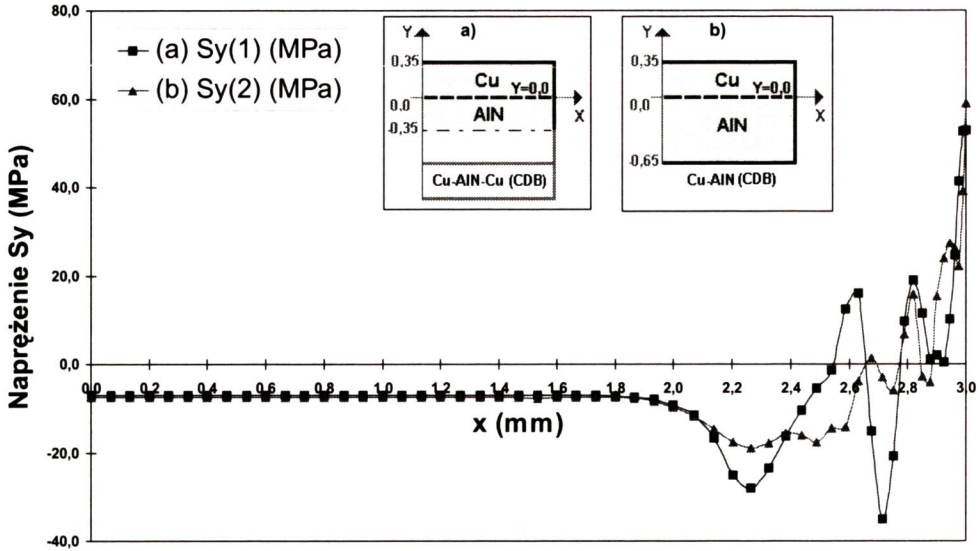


Rys. 5. Przebiegi zmian naprężenia głównego maksymalnego  $S_{max}$  (wzdłuż osi  $y$  dla  $x=3,0$  mm) dla modelu podłoża: a) Cu-AlN-Cu  $\Rightarrow S_{max}(1)$ , b) Cu-AlN  $\Rightarrow S_{max}(2)$ .

Fig. 5. Residual principle stress  $\sigma_{MAX}$  -  $S_{max}$  in: a) Cu-AlN-Cu substrate  $S_{max}(1)$ , b) Cu-AlN substrate  $S_{max}(2)$ ; (along  $y$ -axis for  $x = 3.0$  mm).

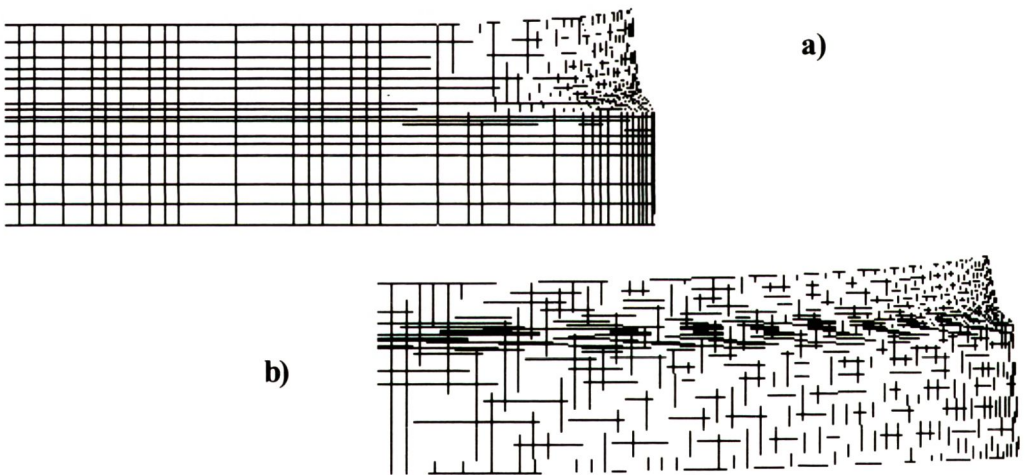
Przedstawione na Rys. 6 rozkłady naprężeń  $S_y$  dla analizowanych modeli podłoży; wzdłuż osi  $x$  dla  $y = 0$ ; wskazują na występowanie naprężeń rozciągających na powierzchni ceramiki i naprężeń ściskających wewnątrz ceramiki. Spowodowane jest to powstaniem momentu zginającego element ceramiczny w wyniku większej niż w ceramice kurczliwości poosiowej (w kierunku  $x$ ) i obwodowej elementu miedzianego w czasie chłodzenia podłoża. W wyniku jego oddziaływania, po zakończonym procesie chłodzenia, elementy połączenia uległy deformacji. Przykładową deformację modelu podłoża, po osiągnięciu temperatury 293K, przedstawia Rys. 7. Obrazy deformacji obejmują odkształcenia cieplne, sprężyste i plastyczne jakich doznały podłoża w zakresie temperatur od 1233 do 293 K.





**Rys. 6.** Przebiegi zmian naprężenia osiowego  $S_y$  (wzdłuż osi  $x$  dla  $y=0$ ) dla modelu podłoża: a) Cu-AlN-Cu  $\Rightarrow S_y(1)$ , b) Cu-AlN  $\Rightarrow S_y(2)$ .

**Fig. 6.** Residual normal stress  $\sigma_y$ -  $S_y$  in: a) Cu-AlN-Cu substrate  $S_y(1)$ , b) Cu-AlN substrate  $S_y(2)$ ; (along  $x$ -axis for  $y = 0$ ).



**Rys. 7.** Przykładowe sprężysto- plastyczne deformacje modeli podłoża: a) symetrycznego Cu-AlN-Cu, b) asymetrycznego Cu-AlN (spajanych metodą CDB) wywołane obciążeniem termicznym od 1233 K do 293 K.

**Fig. 7.** Room temperature deformed shape of: a) symmetric Cu-AlN-Cu, b) asymmetric Cu-AlN; substrates after CDB process.

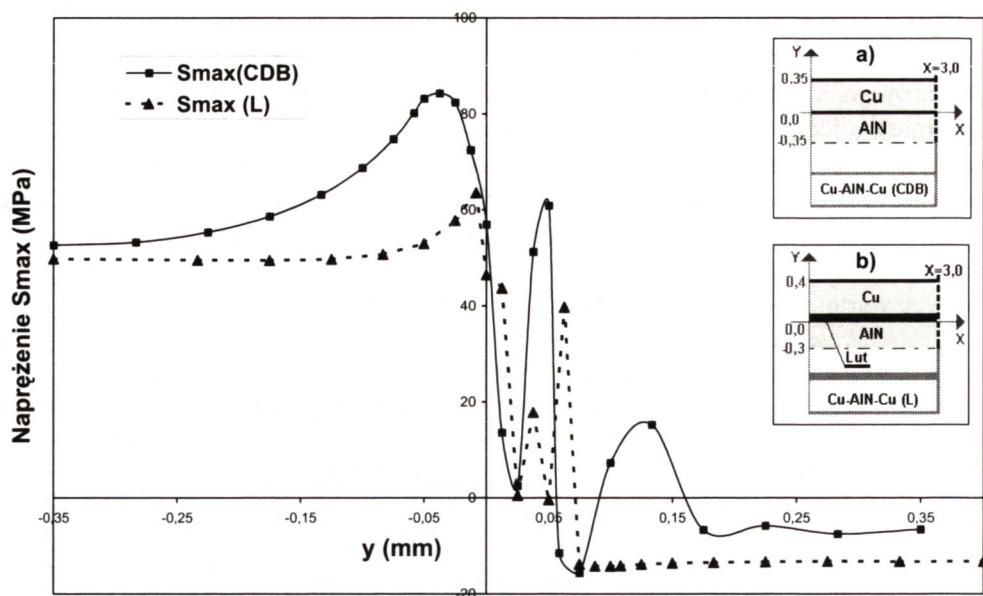
Pozostałe składowe stanu naprężenia (Tab. 2):  $\sigma_x$ , naprężenie styczne  $\tau_{xy}$  oraz naprężenie główne minimalne  $\sigma_{\min}$  nie miały istotnego wpływu na wyężenie elementu ceramicznego, a tym samym całego podłoża. Naprężenia  $\sigma_x$  było ujemne w ceramice (ściskanie), a jego maksymalne wartości bezwzględne były niższe od analizowanych powyżej naprężeń głównych maksymalnych  $\sigma_{\max}$ . Dodatkowo naprężenie to na samej powierzchni zewnętrznej było bliskie zeru. Nie miało więc udziału w kreowaniu naprężeń głównych maksymalnych  $\sigma_{\max}$  jak i minimalnych  $\sigma_{\min}$ . Również naprężenie  $\sigma_{xy}$  oraz naprężenie główne minimalne  $\sigma_{\min}$  w ceramice były ujemne. Osiągnęły one najniższe wartości wewnątrz ceramiki blisko linii połączenia z miedzią.

**Tablica 2.** Ekstremalne wartości naprężeń własnych w elemencie ceramicznym, w miejscu największej koncentracji naprężenia  $\sigma_{\max}$  lub równoważnego mu naprężenia  $\sigma_y$ , podłożu Cu-AlN(-Cu) (otrzymywanych metodą CDB), obliczone metodą elementów skończonych.

**Table. 2.** Maximum values of residual stresses calculated, within ceramic of the Cu-AlN(-Cu) substrates, using FEM.

Model	Naprężenie (MPa)				
	Sy $\sigma_y$	Smax $\sigma_{\max}$	Sx $\sigma_x$	Smin $\sigma_{\min}$	Sxy $\tau_{xy}$
Cu-AlN-Cu X = 3,0 mm Y = -0,0375 mm	84,28	84,28	-1,06	-1,06	-0,028
Cu-AlN X = 3,0 mm y = -0,0125 mm	73,50	73,55	1,66	1,60	-1,96

Dodatkowo na Rys. 8 przedstawiono porównanie przebiegu zmian naprężenia Smax w symetrycznym modelu podłoża Cu-AlN-Cu otrzymanym metodą spajania bezpośredniego CDB jak i lutowania metalizowanej ceramiki z płytkami miedzianymi (lutem AgCu28; obciążenie temperaturowe 1003-293 K). W układzie lutowanym wyliczony poziom naprężeń Smax wynosi 63,53 jest ~ 25% niższy od naprężeń w układzie spajany metodą CDB. Jest to wynikiem niskiej granicy plastyczności spoiwa, która umożliwia łatwe jego odkształcanie się, a tym samym powoduje obniżenie poziomu naprężeń własnych.



**Rys. 8.** Przebiegi zmian naprężenia  $S_{max}$  (wzdłuż osi  $y$  dla  $x=3,0$ ) dla modelu podłoża Cu-AlN-Cu: a) spajanego metodą CDB-  $S_{max}(CDB)$ , b) lutowanego-  $S_{max}(L)$  (grubość lutu 0,05 mm).

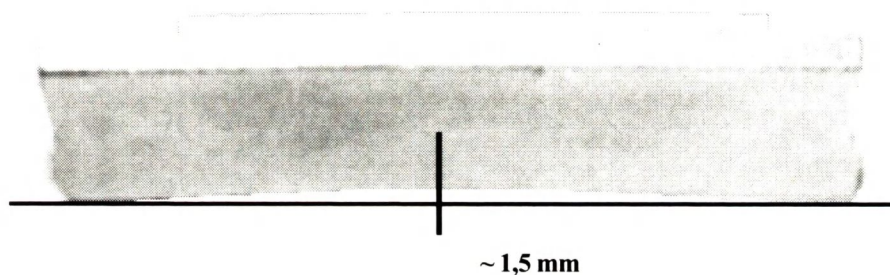
**Fig. 8.** Residual principle stress  $\sigma_{MAX}$  -  $S_{max}$  in Cu-AlN-Cu substrates produced using: a) CDB method -  $S_{max}(CDB)$ , b) brazing method -  $S_{max}(L)$  /filler thickness 0.05 mm/; (along  $y$ -axis for  $x=3.0$  mm).

## 2. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wytrzymałość ceramiki azotkowej na zginanie wynosi średnio 350 MPa [1,2]. Z tego punktu widzenia wyliczony poziom koncentracji naprężeń maksymalnych w ceramice nie powinien mieć większego wpływu na wytrzymałość termomechaniczną podłoża Cu-AlN otrzymywanych metodą spajania bezpośredniego, dla przyjętych do obliczeń grubości materiałów. W obu analizowanych układach (symetrycznym i asymetrycznym) naprężenia osiowe  $\sigma_y$  (wywołujące zginanie podłoża), których rozkład i poziom w ceramice pokrywa się z naprężeniami maksymalnymi  $\sigma_{MAX}$ , osiągnęły według obliczeń wartości odpowiednio: 84,28 MPa w układzie symetrycznym oraz 73,5 MPa w podłożu asymetrycznym. Oznacza to małe prawdopodobieństwo powstania pęknięcia w elemencie ceramicznym, które mogłoby doprowadzić do zniszczenia jego, a tym samym i całego podłoża.

Z numerycznych obliczeń naprężeń własnych termicznych wynika, że pomimo znacznego zróżnicowania właściwości spajanych elementów (szczególnie współczynników rozszerzalności liniowej  $\alpha$ ), poziom naprężeń w analizowanych modułach Cu-

AlN(-Cu) jest stosunkowo niski. Należy jednak podkreślić, że obliczenia te przeprowadzono dla modeli o niewielkich wymiarach elementów. Jako, że znaczną rolę w generowaniu się naprężeń własnych odgrywają także czynniki geometryczne (kształt, wymiary) zwiększenie wymiarów spajanych elementów może prowadzić do wzrostu poziomu naprężeń i związanej z nimi większej deformacji modułu m-c (-m). Przykładowe odkształcenie elementów połączenia jakie występuje przy lutowaniu metalizowanej ceramiki  $Al_2O_3$  (metalizacja Mo-Mn) o wymiarach 30 x 30 x 0,64 mm do płytki miedzianej 30 x 90 x 4 mm lutem niskotopliwym SnPb40 przedstawiono na Rys. 9. Strzałka ugięcia w płaszczyźnie prostopadłej do płytki miedzianej wynosiła  $\sim 1,5$  mm.



**Rys. 9.** Odkształcenie elementów połączenia po próbie lutowania metalizowanej ceramiki  $Al_2O_3$  do płytki miedzianej lutem niskotopliwym SnPb40.

**Fig. 9.** Deformation of  $Al_2O_3$  (Mo-Mn metallized ceramic)/SnPb40/Cu joint after the soldering process.

Zgodnie z obliczonym modelem, odkształceń tych można uniknąć poprzez łączenie modułu m-c-m (Cu-AlN-Cu) o dobranych grubościach warstw materiałów.

Z wykonanych obliczeń i prób technologicznych spajania wynikają następujące wskazania istotne przy projektowaniu układów elektronicznych wykonywanych z materiałów charakteryzujących się różnymi współczynnikami rozszerzalności termicznej:

- moduły do montażu struktur winny być wykonane jako elementy symetryczne np. m-c-m, przy czym grubość okładek metalowych (m) winna być taka sama,
- konstrukcja chłodnicy do montażu winna umożliwiać jej odkształcanie się podczas procesów studzenia po spajaniu,
- w układach, w których powyższe zabiegi są niewystarczające do kompensacji naprężeń, można stosować przejściowe warstwy kompensujące, wykonane np. z materiałów kompozytowych np. W-Cu, Cu-C<sub>F</sub>.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Entezarian M., Drew R.A.L.: Direct bonding of copper to aluminium nitride. *Mater.Sci. Eng.*, A212, 1996, 206-212
- [2] Sheppard L.M.: Aluminium nitride: a versatile but challenging material. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 69, 1990, 11, 1801-1812
- [3] Levy A.: Thermal residual stress in ceramic - to - metal brazed joints. *J. Am. Ceram. Soc.*, 74, 9, 1991, 2141 - 2147
- [4] Kaliński D.: Opracowanie spoiwa kompozytowego do spajania ceramiki korundowej z metalami. *Prace ITME*, 1999, z. 53
- [5] Golański D.: Wpływ rozkładu temperatury i kształtu złącza na stan naprężeń własnych w spajanych kołowo symetrycznych elementach ceramiki korundowej ze stałą. Rozprawa doktorska. Warszawa: WPW 1995
- [6] Sukanume K., Okomoto T., Kamicki K.: Influence of shape and size on residual stress in ceramic/metal joining. *J. Mater. Sc.*, 22, 1987, 3561 - 3565
- [7] Piechnik S.: Wytrzymałość materiałów dla wydziałów budowlanych. Warszawa: PWN, 1978

## THERMAL RESIDUAL STRESSES IN JOINED ELEMENTS OF AlN CERAMICS TO COPPER

### SUMMARY

FEM - the *finite element method* was used to determine the thermal residual stresses in direct bonding (CDB - *copper direct bonding method*) Cu-AlN-Cu substrates. Such layered substrates are used in electronics and optoelectronics to assemble semiconductor structures.

These substrates are subjected to residual stresses due to thermal expansion mismatch between AlN ceramic and copper. These stresses depend on the properties of the joining materials and configuration of the system as well. The thermal residual stresses can lead to deformation of ceramic-metal substrates.

The calculations of residual stresses were performed on symmetrical (Cu-AlN-Cu) and asymmetric (Cu-AlN) arrangement of the substrates, for typical thickness of materials used in these types of modules. Knowing the value and distribution of the residual stresses in the substrates we can modify their construction (thickness of parts e.g.) in order to diminish the stress level.