

PRZEKŁADKI KOMPENSACYJNE W ZGRZEWANYCH DYFUZYJNIE ZŁĄCZACH Al_2O_3 - STAL 15. ASPEKTY MATERIAŁOWE I KONSTRUKCYJNE

Dariusz Kaliński¹, Marcin Chmielewski¹

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących możliwości otrzymania zgrzewanego dyfuzyjnie złącza Al_2O_3 |przekładka| - stal 15 charakteryzującego się jak najkorzystniejszym rozkładem i niskim poziomem naprężeń własnych. Badania obejmowały analizę stanu naprężeń własnych termicznych przeprowadzoną metodą elementów skończonych, dla wybranych materiałów przekładek tj.: miedzi, stopu FeNi42 i molibdenu, o grubości w zakresie 0,1÷1,0 mm. Prace prowadzono w odniesieniu do przekładek pojedynczych jak i warstwowych (dwumateriałowych). Najniższym poziomem naprężeń własnych σ_{MAX} oraz korzystnym ich rozkładem charakteryzowało się złącze Al_2O_3 |przekładka warstwowa FeNi42/ Cu| - stal 15. W połączeniu tym przekładka I, leżąca przy ceramice była materiałem o niskiej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej (FeNi42) i grubości 0,5 mm, a przekładka II materiałem plastycznym (Cu) o tej samej grubości. W przypadku tego połączenia naprężenie σ_{MAX} osiągnęło wartość 181 MPa i było o ok. 80% niższe niż w połączeniu bez przekładki (878 MPa), a obszar koncentracji niebezpiecznych naprężeń uległ przemieszczeniu z linii spojenia ceramika/ przekładka I o stosunkowo niskiej wytrzymałości do linii spojenia przekładka I/ przekładka II o wyższej wytrzymałości.

1. WPROWADZENIE

Obliczenia numeryczne (MES) stanu naprężeń własnych, przeprowadzone dla zgrzewanego dyfuzyjnie modelu połączenia Al_2O_3 - stal 15 wykazały, że są one bardzo wysokie, a naprężenie główne maksymalne σ_{MAX} , rozciągające w ceramice, osiąga poziom 878 MPa. Przy tak wysokim poziomie naprężenia istnieje bardzo duże prawdopodobieństwo powstania pęknięć w elemencie ceramicznym połączenia co praktycznie wyklucza możliwość otrzymania tych złączy techniką zgrzewania dyfuzyjnego. Istnieją jednak przypadki połączeń,

¹⁾ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133,
01-919 Warszawa, e-mail: dkalins@poczta.onet.pl

w których technika zgrzewania dyfuzyjnego powinna być zastosowana. Dlatego też w kolejnych etapach badań przedstawionych w tej pracy przeanalizowano możliwość obniżenia poziomu naprężeń własnych poprzez zastosowanie przekładek kompensacyjnych.

Ciepne naprężenia własne są jednym z ważniejszych problemów technicznych zarówno w produkcji jak i w eksploatacji połączeń ceramiczno-metalowych. Wynika to z faktu zarówno ich wielkości jak i superpozycji z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych (eksploatacyjnych). Najgroźniejszy dla złącza ceramiczno-metalowego jest przypadek, w którym rozciągające naprężenia własne w ceramice sumują się z rozciągającymi naprężeniami eksploatacyjnymi, co prowadzić może do przekroczenia wytrzymałości materiału ceramicznego i jego zniszczenia, a tym samym do zniszczenia całego połączenia. Zarówno w kraju jak i zagranicą prowadzone są intensywne prace badawcze w kierunku poznania czynników wpływających na stan naprężeń własnych w złączach ceramika-metal oraz metod ich redukcji, co w efekcie powinno pozwolić na otrzymywanie połączenia o wyższym stopniu niezawodności eksploatacyjnej [1-5].

Na poziom i rozkład naprężeń własnych w złączach ceramika-metal największy wpływ wywiera różnica współczynników rozszerzalności cieplnej α ceramiki i metalu. Współczynniki rozszerzalności cieplnej materiałów ceramicznych są zazwyczaj niższe niż dla metali, co sprawia, że w materiale o niższym współczynniku rozszerzalności cieplnej powstają lokalne naprężenia rozciągające o znacznych wartościach. Wysoki poziom rozciągających naprężeń własnych, powiązany z małą wytrzymałością mechaniczną (niska odporność na pękanie) materiału ceramicznego, prowadzi do jego pęknięcia, a co za tym idzie zniszczenia złącza ceramika-metal. Istotną rolę przy generowaniu naprężeń własnych w złączach ceramika-metal odgrywa także moduł sprężystości podłużnej E spajanych materiałów oraz granica plastyczności metalu i przebieg naprężenia uplastyczniającego (umocnienia). Moduł E w przypadku większości metali jest niższy od jego odpowiednika dla materiałów ceramicznych. Choć nie wpływa on bezpośrednio na wartość skurczu poszczególnych materiałów złącza, to jednak jego wartość, która decyduje o sztywności materiału, ma wpływ na wartość sił i momentów jakie działają w strefie spajania oraz na sztywność całego połączenia. Im wyższą wartość wykazuje moduł E , tym wyższe naprężenie w metalu i w ceramice generowane jest przez odkształcenie cieplne złącza. Niższa wartość granicy plastyczności oraz mniejsze umocnienie sprawiają, że powstające w trakcie chłodzenia naprężenia cieplne mają małą wartość w metalu, a dzięki temu i w spajanej z nim ceramice.

Śród metod redukcji poziomu naprężeń własnych wyróżnić można dwa kierunki: jeden to stosowanie przekładek kompensacyjnych, drugi- dobór kształtu łączonych elementów. Badania [6-8] wykazały, że przekładki kompensacyjne

mają istotny wpływ na obniżenie poziomu naprężeń własnych. Mimo tego, że są elementami dodatkowymi i jako takie w pewnym stopniu komplikują proces spajania często stosuje się je w praktyce.

Materiały stosowane na przekładki można podzielić na: przekładki plastyczne tzw. „miękkie”, wykonane z materiałów charakteryzujących się dużą plastycznością (np. Cu) - przekładki takie odkształcając się plastycznie przenoszą naprężenia między metalem a ceramiką; przekładki „twarde” wykonane z metali lub stopów o współczynniku rozszerzalności cieplnej α , o wartości pośredniej pomiędzy ceramiką a metalem spajany (np. Mo, Nb, Kowar) oraz przekładki „warstwowe”- stanowiące połączenie ww. przekładek (np. Cu/ Kowar, Cu/ Mo). Optymalny wybór materiału przekładki zależy m.in. od różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej spajanych materiałów, zmian właściwości mechanicznych przekładki w funkcji temperatury jak i jej grubości.

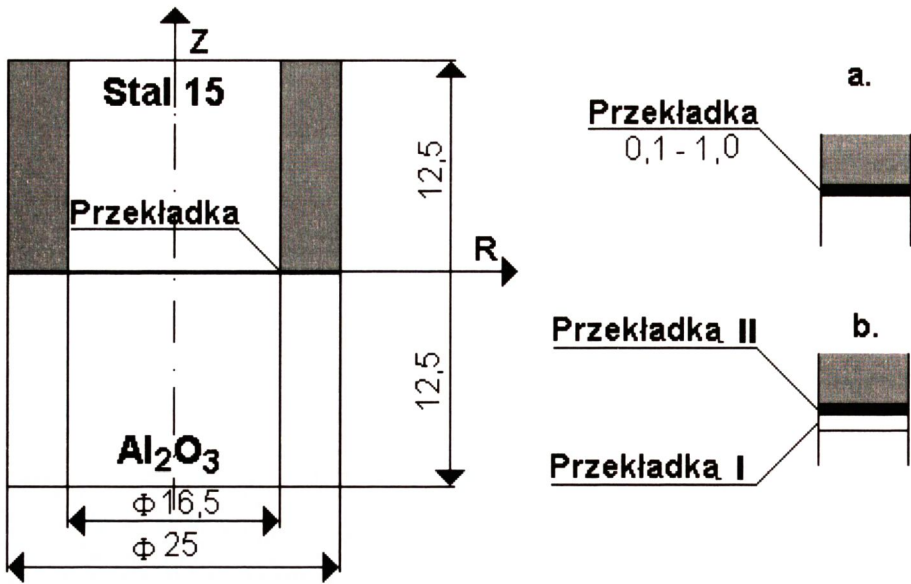
Istotny wpływ na poziom naprężeń własnych w złączu ceramika- metal ma także zastosowana technika spajania. I tak np. połączenia lutowane w stosunku do zgrzewanych dyfuzyjnie charakteryzują się niższym poziomem cieplnych naprężeń własnych, głównie z uwagi na relaksację tych naprężeń w spoiwie.

2. PRZEDMIOT ANALIZY

Do analizy przyjęto kołowsymetryczne połączenie tulei ceramicznej Al_2O_3 z tuleją wykonaną ze stali konstrukcyjnej w gatunku 15 (rys.1). Założono, że połączenie wykonywane jest w procesie zgrzewania dyfuzyjnego.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono szczegółową analizę numeryczną naprężeń własnych w płaskim czołowym modelu połączenia Al_2O_3 -stal 15.

Kolejne etapy badań dotyczyły możliwości otrzymania analizowanego złącza charakteryzującego się jak najkorzystniejszym rozkładem i niskim poziomem naprężeń własnych, poprzez zastosowanie przekładek kompensacyjnych umieszczanych pomiędzy elementem ceramicznym a metalowym połączenia. Analizę stanu naprężeń własnych termicznych przeprowadzono dla wybranych materiałów przekładek tj.: miedzi, stopu FeNi42 i molibdenu, o grubości w zakresie 0,1+1,0 mm (rys.1a). Pozwoliło to na przeanalizowanie zarówno przekładek „miękkich” (o niskiej wartości granicy plastyczności) jak i przekładek „twardych” (o niskiej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej α). Badania prowadzono zarówno w odniesieniu do przekładek pojedynczych (rys. 1a) jak i warstwowych (rys.1b).



Rys. 1. Model zgrzewanego dyfuzyjnie złącza Al_2O_3 |przekładka | - stal 15, przyjętego do obliczeń naprężeń własnych za pomocą MES.

Fig. 1. The model of the diffusion bonded Al_2O_3 |interlayer | - steel 15 for the residual stress calculation by FEM.

3. METODA I ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH

Do analizy rozkładu i poziomu naprężeń własnych termicznych, dla przyjętego modelu połączenia, zastosowano numeryczny program metody elementów skończonych „TSP” opracowany na Politechnice Warszawskiej w Zakładzie Inżynierii Spajania.

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

- materiały w przyjętej analizie wykazują właściwości izotropowe,
- w analizowanych materiałach, podczas spajania, zachodzą zjawiska w zakresie termo-sprężysto-plastycznym,
- odkształcenia w materiałach opisywane są zależnościami z zakresu liniowej teorii sprężystości i małych odkształceń plastycznych,
- zachowanie plastyczne materiału opisano równaniami teorii plastycznego płynięcia, przyjmując warunek plastyczności Hubera-Mises’a,
- założono, że nie występuje gradient temperatury w spajanych materiałach.

Z uwagi na symetrię osiową do obliczeń wzięto połowę założonego modelu. Siatka została zagęszczona w obszarze przypuszczalnego spiętrzenia naprężeń w ceramice tj. przy zewnętrznej powierzchni walcowej oraz w pobliżu linii połączenia ceramika/metal.

Właściwości materiałów do analizy naprężeń własnych określone przez: współczynnik rozszerzalności cieplnej α , moduł Younga E, granicę plastyczności Re oraz liczbę Poissona ν przedstawiono w tabeli 1. Za wyjątkiem liczby Poissona, którą przyjęto jako stałą niezależnie od temperatury, pozostałe wielkości były zmienne z temperaturą.

Warunki obciążenia modelu wynikają z procesu jego spajania. Głównym czynnikiem, a zarazem generatorem naprężeń w złączu są zmiany temperatury. To właśnie jej spadek od maksymalnej temperatury procesu do temperatury otoczenia, przy jednoczesnej różnicy właściwości spajanych materiałów ($\Delta\alpha$, ΔE) powoduje powstanie naprężeń własnych w spajanym złączu. Do obliczeń przyjęto obciążenie temperaturowe mieszczące się w zakresie 1133 K+293 K, co oznacza że naprężenia własne generowane są w złączu przy obniżaniu się temperatury, elementów połączonych w temperaturze 1133 K. Określone naprężenia odpowiadałyby więc naprężeniom powstałym w trakcie zgrzewania dyfuzyjnego łączonych materiałów.

Tabela 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne materiałów (w temperaturze otoczenia) przyjęte do obliczeń numerycznych stanu naprężeń własnych.

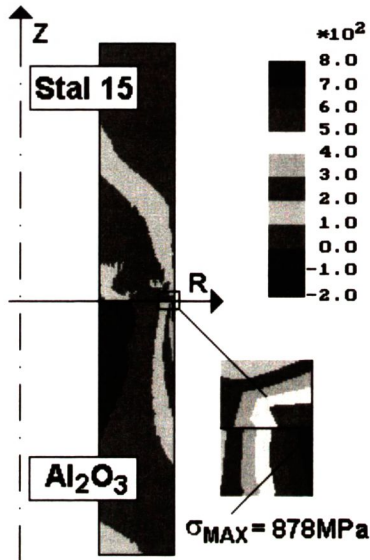
Table 1. Materials properties (at room temperature) used for calculation by FEM of the residual stress.

Material	E (GPa)	Re (MPa)	α (*10 ⁻⁶ /K)	ν
Al ₂ O ₃	318	-	5,62	0,220
Cu	125	50	16,50	0,345
FeNi42	125	320	5,28	0,220
Mo	340	365	5,35	0,380
Stal 15	202	216	11,96	0,330

4. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH NAPRĘZEŃ 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 (σ_z), promieniowe (σ_r), obwodowe (σ_t), styczne (τ_{Rz}) oraz naprężenia główne maksymalne (σ_{MAX}) i minimalne (σ_{MIN}).

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że maksymalne naprężenie w elemencie ceramicznym σ_{MAX} występuje na zewnętrznej ściance tulei w niewielkiej odległości od linii spojenia ze stalą ($r = 12,481 \text{ mm}$, $z = -0,038 \text{ mm}$), gdzie osiągnęło najwyższą wartość 878 MPa (rys. 2). Miejsce to jest obszarem największej koncentracji naprężenia w ceramice. Oznacza to, 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.



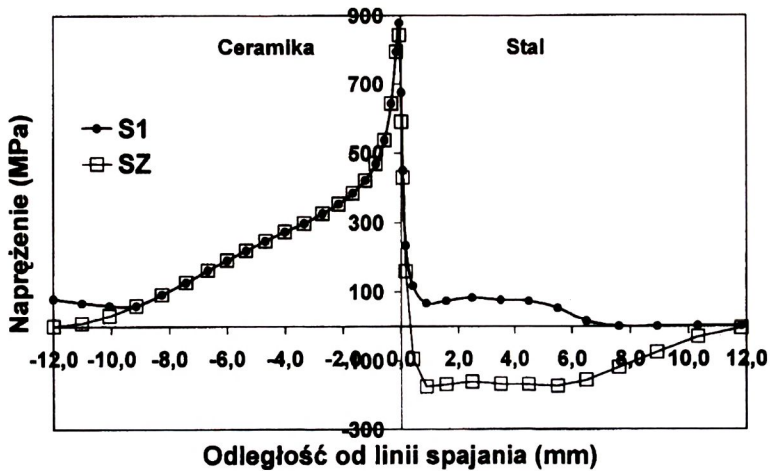
Rys. 2. Rozkład naprężenia σ_{MAX} w zgrzewanym dyfuzyjnie złączu Al_2O_3 - stal 15 obliczony za pomocą MES.

Fig. 2. The principal residual stress (σ_{MAX}) distribution in the diffusion bonded Al_2O_3 - steel 15 joint calculated by FEM.

Spośród wszystkich składowych naprężenia wyróżnić można naprężenie osiowe σ_z , którego rozkład i poziom w ceramice jest bardzo zbliżony do naprężenia σ_{MAX} , co przedstawiono na rys. 3. Z rysunku tego widać, że maksymalne naprężenie w elemencie ceramicznym utożsamiać można z naprężeniem osiowym σ_z bowiem obie krzywe praktycznie pokrywają się w obszarze części ceramicznej złącza.

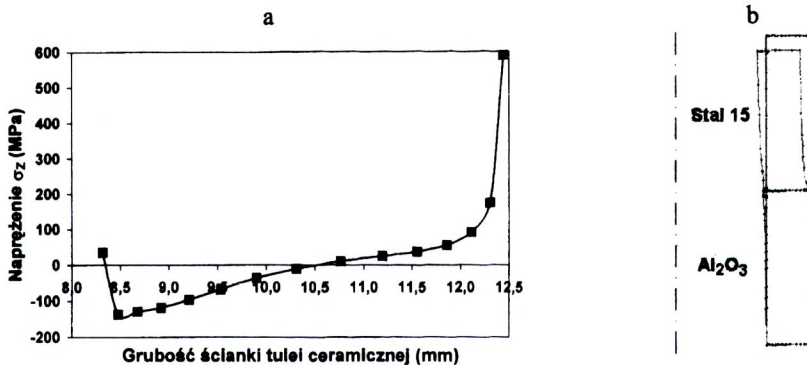
Rozkład naprężenia σ_z na grubości ścianki wskazuje na występowanie naprężeń rozciągających na zewnętrznej stronie ścianki ceramicznej i naprężeń ściskających na jej wewnętrznej stronie (rys. 4a). Spowodowane to zostało powstaniem momentu zginającego element ceramiczny w wyniku większego

niż w ceramice skurczu promieniowego i obwodowego elementu stalowego w czasie chłodzenia złącza. W wyniku jego oddziaływania, po zakończonym procesie chłodzenia, elementy uległy deformacji, którą przedstawiono na rys. 4b.



Rys. 3. Porównanie poosiowego rozkładu naprężenia σ_{MAX} (S1) i σ_z (SZ) w zgrzewanym dyfuzyjnie złącza Al_2O_3 - stal 15, obliczonego za pomocą MES.

Fig. 3. Comparison of the principal stress σ_{MAX} (S1) and axial σ_z (SZ) stress distribution in the diffusion bonded Al_2O_3 - steel 15 joint calculated by FEM.



Rys. 4. Promieniowy rozkład naprężenia σ_z (na grubości ścianki tulei ceramicznej, w pobliżu granicy rozdziału ze stalą) w zgrzewanym dyfuzyjnie złącza Al_2O_3 - stal 15 (a) oraz deformacja modelu złącza wywołana obciążeniem termicznym 1133 K+293 K (b).

Fig. 4. Radial distribution of the axial stress σ_z (across the ceramic thickness wall near the interface with steel) the diffusion bonded Al_2O_3 - steel 15 joint (a) and deformation of the model joint due to a thermal load of 1133 K+293 K (b).

Pozostałe składowe stanu naprężenia: σ_R , σ_{RZ} , σ_T oraz naprężenie główne minimalne σ_{MIN} nie miały większego wpływu na wyężnienie elementu ceramicznego, a tym samym całego połączenia. Naprężenia σ_R były ujemne w ceramice (ściskanie), a ich maksymalne wartości bezwzględne były niższe od analizowanych powyżej naprężeń głównych maksymalnych σ_{MAX} . Również naprężenie obwodowe σ_T oraz naprężenie główne minimalne σ_{MIN} (stanowiące parę o zbliżonym rozkładzie w elemencie ceramicznym) były ujemne w ceramice. Osiągnęły one najniższe wartości przy wewnętrznej powierzchni ceramiki blisko linii połączenia z metalem. Także naprężenie styczne τ_{RZ} było ujemne w ceramice.

W tabelicy 2 zebrano wyniki obrazujące ekstremalne wartości wszystkich składowych stanu naprężenia w elemencie ceramicznym, w miejscu największej koncentracji naprężenia σ_{MAX} .

Tabela 2. Ekstremalne wartości składowych stanu naprężenia w elemencie ceramicznym, zgrzewanego dyfuzyjnie złącza Al₂O₃-stal 15, obliczone metodą elementów skończonych.

Table. 2. Calculated by FEM maximum values of the stress state components inside the ceramic device in the diffusion bonded Al₂O₃- steel 15 joint.

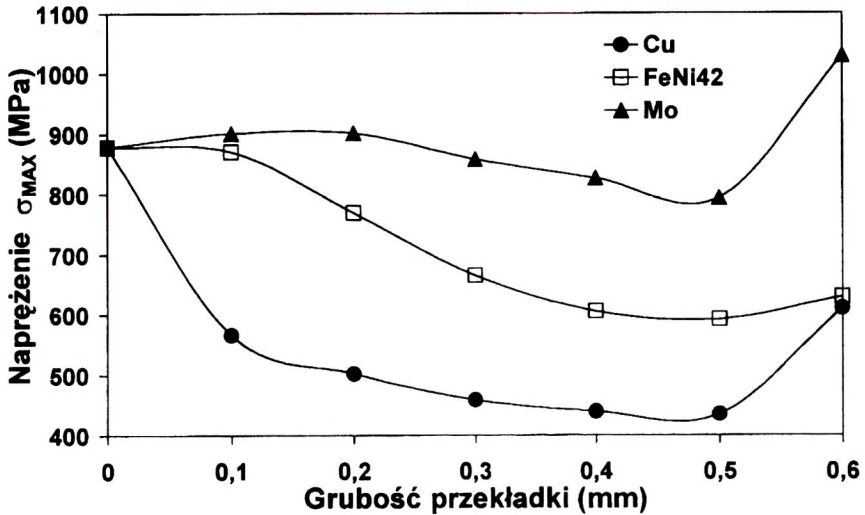
Naprężenie (MPa)					
σ_Z	σ_{MAX}	σ_R	σ_T	τ_{RZ}	σ_{MIN}
842	878	-339	-325	-209	-376

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych rozkładu naprężeń własnych w zgrzewanym dyfuzyjnie złączu Al₂O₃-stal 15 stwierdzono występowanie koncentracji rozciągającego w ceramice naprężenia σ_{MAX} , które osiągnęło poziom 878,6 MPa. Oznacza to możliwość powstania pęknięć w elemencie ceramicznym, które mogą doprowadzić do zniszczenia złącza. Potwierdzeniem możliwości rzeczywistego pojawienia się pęknięć w ceramice, może być praca [3], w której identyczne (zarówno w odniesieniu do kształtu jak i materiałów) złącze, tuż po zakończonym procesie spajania (lutowania), uległo zniszczeniu na skutek pęknięcia elementu ceramicznego. W połączeniu tym, obliczona wartość naprężeń własnych σ_{MAX} wynosiła 271 MPa. (Niższa wartość generujących się naprężeń własnych wynikała z zastosowania techniki lutowania, a nie jak w omawianym w artykule zgrzewania dyfuzyjnego.)

Jak już zaznaczono obniżenie poziomu naprężeń własnych w połączeniach ceramika-metal osiągnąć można m.in. poprzez zastosowanie przekładek kompensacyjnych umieszczanych pomiędzy częścią ceramiczną a metalową złącza.

Do analizy wpływu rodzaju materiału i grubości przekładki umieszczonej pomiędzy częścią ceramiczną a metalową złącza na niezawodność jego pracy przyjęto, że o wyężnieniu połączenia decydują największe naprężenia rozciągające występujące w ceramice σ_{MAX} [2-3].

Na rys. 5 przedstawiono wpływ rodzaju i grubości przekładki na poziom naprężeń własnych (σ_{MAX}) w elemencie ceramicznym analizowanego modelu połączenia Al_2O_3 |przekładka| - stal 15. Widać z niego, że zdecydowanie największe obniżenie poziomu naprężeń σ_{MAX} otrzymano w przypadku zastosowania przekładki miedzianej. Już dla grubości przekładki miedzianej 0,1 mm poziom naprężenia σ_{MAX} obniżył się o ok. 35% (566 MPa) w porównaniu do złącza bez przekładki (878 MPa).

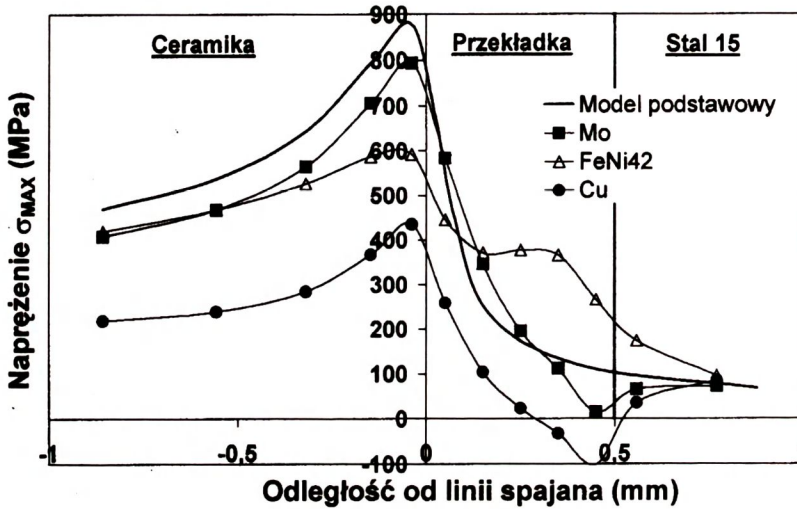


Rys. 5. Wpływ materiału przekładki oraz jej grubości na poziom naprężeń własnych w zgrzanym dyfuzyjnie złączu Al_2O_3 |przekładka| - stal 15.

W analizowanych modelach połączeń z przekładkami kompensacyjnymi naprężenia własne σ_{MAX} maleją wraz ze zwiększaniem grubości przekładki. Tylko w przypadku przekładki molibdenowej o grubości do 0,2 mm obserwuje się jeszcze nieznaczny wzrost wartości naprężenia σ_{MAX} . Najniższy poziom naprężeń własnych występuje w złączach o grubości przekładki ok. 0,5 mm (rys. 5). Dalsze zwiększanie grubości przekładki prowadziło do wzrostu poziomu tych naprężeń. W przypadku miedzianej przekładki o grubości 0,5 mm naprężenie σ_{MAX} osiągnęło wartość 435 MPa i było o ok. 50% niższe niż w połączenia bez przekładki (rys.6). Dla przekładki ze stopu FeNi42 o tej samej grubości otrzymano spadek wartości naprężenia σ_{MAX} o ok. 32% (592 MPa - rys. 6). W przypadku przekładki molibdenowej o grubości 0,5 mm, obniżenie poziomu naprężenia σ_{MAX} wyniosło tylko ok. 10% (794 MPa - rys. 6). Mniejsze obniżenie poziomu naprężeń własnych przy stosowaniu przekładki molibdenowej, w porównaniu do przekładki ze stopu FeNi42 (o zbliżonym współczynniku rozszerzalności cieplnej) spowodowane jest m.in. dużą wartością modułu

Younga molibdenu (tabela 1). Jak już zaznaczono, im wyższą wartość wykazuje moduł E, tym wyższe naprężenie w metalu i w ceramice generowane jest przez odkształcenie cieplne złącza.

Można stwierdzić, że większy wpływ na obniżenie poziomu naprężeń własnych ma możliwość plastycznego odkształcania się przedkładki niż zmniejszenie różnicy wartości współczynników rozszerzalności cieplnej ceramiki i metalu.



Rys. 6. Charakter przebiegu naprężeń własnych σ_{MAX} w zgrzewanym dyfuzyjnie złączu Al_2O_3 | przedkładka | stal 15, obliczony za pomocą MES. Grubość przedkładki- 0,5 mm.

Fig. 6. The profile of the principal residual stress (σ_{MAX}) across the diffusion bonded Al_2O_3 | interlayer | steel 15 joint calculated by FEM. Thickness of the interlayer 0,5 mm.

Przyjmując wytrzymałość ceramiki na zginanie (ok. 250 MPa), jako kryterium otrzymania złącza bez pęknięć widać, że pomimo zastosowania przedkładki kompensacyjnej poziom naprężeń własnych nadal znacznie przekracza dopuszczalną granicę wytrzymałości ceramiki.

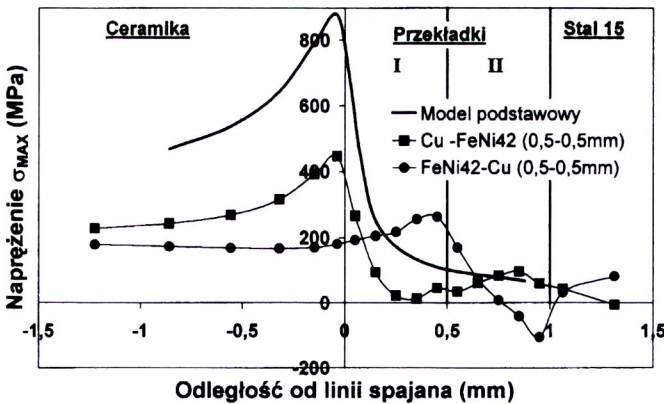
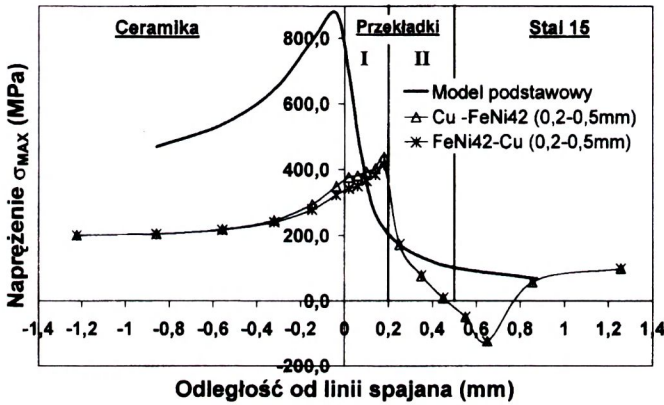
Dalsze obniżenie poziomu naprężeń własnych w analizowanym złączu przyniosło zastosowanie warstwowego (dwumateriałowego) układu przedładek (tabela 3).

Z tabeli 3 wynika, że najlepsze wyniki otrzymano dla przedładek warstwowych Cu/FeNi42. W tym przypadku najniższym poziomem naprężenia σ_{MAX} (181 MPa) charakteryzowało się złącze w którym przedkładka I, leżąca przy ceramice była materiałem o niskiej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej (FeNi42) i grubości 0,5 mm, a przedkładka II materiałem plastycznym (Cu) o tej samej grubości (rys. 7).

Tabela 3. Przykładowe wyniki obliczeń (MES) ekstremalnych wartości naprężenia σ_{MAX} w elemencie ceramicznym zgrzewanego dyfuzyjnie złącza Al_2O_3 |przekładka warstwowa| - stal 15.
Table 3. Calculated by FEM maximum values of the principal residual stress (σ_{MAX}) inside the ceramic device in the diffusion bonded Al_2O_3 |composite interlayer Cu/FeNi42- steel 15 joint.

Materiał przekładki (Przekładka I/ Przekładka II)*	Grubość przekładki (mm)	Naprężenie σ_{MAX} (MPa)
Cu/ Mo	0,5/ 0,5	438
Mo/ Cu	0,5/ 0,5	509
Cu/ FeNi42	0,2/ 0,5	349
FeNi42/ Cu	0,2/ 0,5	322
Cu/ FeNi42	0,5/ 0,5	446
FeNi42/ Cu	0,5/ 0,5	181

*) Przekładka I – od strony ceramiki



Rys. 7. Charakter przebiegu naprężeń własnych σ_{MAX} w zgrzewanym dyfuzyjnie złączu Al_2O_3 |przekładka warstwowa Cu/FeNi42| - stal 15, dla różnych konfiguracji złącza.

Fig. 7. The principal residual stress (σ_{MAX}) profile in the diffusion bonded Al_2O_3 |composite interlayer Cu/ FeNi42| - steel 15 joint for different joint configuration.

Kolejność ustawienia materiałów przekładek w złączu ma istotny wpływ na charakter odkształcenia temperaturowego, a tym samym na poziom i rozkład naprężeń własnych.

W przypadku przekładek warstwowych (w zależności od stosunku grubości przekładek oraz ich kolejności), na uwagę zasługuje fakt przemieszczenia koncentracji niebezpiecznych naprężeń z linii spojenia ceramika/ przekładka I o stosunkowo niskiej wytrzymałości do linii spojenia przekładka I/ przekładka II o wyższej wytrzymałości (rys. 7). Całkowita różnica współczynników α między ceramiką, a łączonym z nią metalem rozłożona zostaje na trzy różne obszary spajania.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione w pracy wyniki badań wykazały, że dla zgrzewanych dyfuzyjnie złączy ceramika- metal, można uzyskać znaczny spadek wartości naprężeń własnych poprzez wprowadzenie przekładek kompensacyjnych. Przeprowadzone badania obejmowały analizę stanu naprężeń własnych termicznych (metodą elementów skończonych) w zgrzewanym dyfuzyjnie złączu Al_2O_3 |przekładka | - stal 15, dla wybranych materiałów przekładek tj.: miedzi, stopu FeNi42 i molibdenu, o grubości w zakresie 0,1+1,0 mm. Prace prowadzono w odniesieniu do przekładek pojedynczych jak i warstwowych (dwumateriałowych).

W przypadku przekładek pojedynczych najniższy poziom naprężeń własnych (σ_{MAX}) otrzymano dla miedzianej przekładki o grubości 0,5 mm. Analizowane naprężenie σ_{MAX} osiągnęło wartość 435 MPa i było o ok. 50,5% niż w połączenia bez przekładki (rys. 5 i 6).

Najniższym poziomem naprężeń własnych σ_{MAX} oraz korzystnym ich rozkładem charakteryzowało się złącze Al_2O_3 |przekładka warstwowa FeNi42/Cu | - stal 15 (tabela 3, rys. 7). W połączeniu tym przekładka I, leżąca przy ceramice była materiałem o niskiej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej (FeNi42) i grubości 0,5 mm, a przekładka II materiałem plastycznym (Cu) o tej samej grubości. W przypadku tego połączenia naprężenie σ_{MAX} osiągnęło wartość 181 MPa i było o ok. 80% niższe niż w połączenia bez przekładki (878 MPa), a obszar koncentracji niebezpiecznych naprężeń uległ przemieszczeniu z linii spojenia ceramika/ przekładka I o stosunkowo niskiej wytrzymałości do linii spojenia przekładka I/ przekładka II o wyższej wytrzymałości.

Należy podkreślić, że przedstawione w artykule wyniki, dotyczą wybranego przypadku złącza zarówno w odniesieniu do jego kształtu jak i materiałów. Poza przypadkami omówionymi w artykule, w literaturze można znaleźć m.in. wyniki prac dotyczących zmiany kształtu elementów spajanych, a także odpo-

wiedniego ukształtowania samych przekładek. Autorzy tej pracy analizowali również inne możliwości obniżenia poziomu naprężeń własnych i korzystniejszego ich rozkładu.

Przedstawione wyniki są więc pewnego rodzaju kontynuacją prac innych autorów zarówno polskich [1-4] jak i zagranicznych [5-8]. Na ich podstawie można stwierdzić, że:

- redukcja poziomu naprężeń własnych w złączach ceramika- metal może być osiągnięta m.in. dzięki stosowaniu przekładek kompensacyjnych;
- zarówno rodzaj jak i grubość materiału przekładki ma istotny wpływ na poziom i rozkład naprężeń własnych. Im grubsza, do pewnej wartości, przekładka tym naprężenia własne niższe;
- większy wpływ na obniżenie poziomu naprężeń własnych ma możliwość plastycznego odkształcania się przekładki niż zmniejszenie różnicy wartości współczynników rozszerzalności cieplnej ceramiki i metalu;
- w przypadku stosowania przekładek warstwowych bardzo istotna jest „kolejność” ustawienia materiałów przekładek i wzajemny stosunek ich grubości. Uwzględnienie tego czynnika prowadzi do przemieszczenia koncentracji niebezpiecznych naprężeń z linii spojenia ceramika/ przekładka I o stosunkowo niskiej wytrzymałości do linii spojenia przekładka I/ przekładka II o wyższej wytrzymałości.

LITERATURA

- [1] Włosiński W., Golański D.: The key issues affecting the strength of bonded ceramic to metal joints. *Advances In Manufacturing Science and Technology*, 25, 4 (2001) 21-37
- [2] Olesińska W., Kaliński D., Golański D.: Opracowanie metody badań nieniszczących do weryfikacji złożonych konstrukcji ceramiczno-metalowych. Raport końcowy, Grant KBN Nr 7T08C 021 17, (2001)
- [3] Golański D.: Wpływ rozkładu temperatury oraz kształtu złącza na stan naprężeń w spajanych kołowsymetrycznych elementach ceramiki korundowej ze stalą rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1994
- [4] Ferenc K., Tomaszewski K: Distribution of thermal residual stresses in various types of metal-to-ceramic joints as analysed by FEM. *Mat. Konf. „Joining Ceramics, Glass and Metal”*, DGM Informationsgesellschaft Verlag (1989)
- [5] Seo K., Kusuka M., Nogato F., Terasaki T., Nakao Y., Saida K.: Study of thermal stress at ceramic-metal joint. *JSME International Journal Series 1*, 33 (1990) 3
- [6] Zhou Y., Bao F.H., Ren J.L., North T.H.: Iterlayer selection and thermal stresses in brazed Si_3N_4 -steel joints. *Mat. Science and Technology*, 7 (1991) 863-868

- [7] Xian A.P., Yoasi Z.: Interlayer design for joining pressureless sintered silicon ceramics and 40 Cr steel brazing with $\text{Ag}_{57}\text{Cu}_{38}\text{Ti}_5$ filler metal. *Journal of Materials Science* 27 (1992) 1560-1566
- [8] Lugscheider E., Boretius M.: Active brazing of silicon-carbide and silicon-nitride to steel using a thermal-stress reducing metallic interlayer. *Mat. Konf. „Joining Ceramics, Glass and Metal”*, DGM Informationsgesellschaft Verlag (1989)

INTERLAYERS IN DIFFUSION BONDING Al_2O_3 - STEEL 15 JOINTS- MATERIALS AND DESIGN

Summary

The paper presents the results of experiment concerning possibilities of obtaining Al_2O_3 |interlayer| - steel 15 joints by the diffusion bonding technique which should possess the most advantageous distribution and low level of thermal stresses. The experiment included the residual thermal stresses analyses performed using the finite elements method (FEM) for chosen materials of interlayers that is: copper, FeNi42 alloy and molybdenum. Thickness of the interlayer ranged from 0,1 mm to 1 mm. The analyses were performed for single and double interlayer (Cu-Mo, Cu-FeNi42). The lowest level of the thermal residual stress σ_{MAX} and the most advantageous distribution was obtained for Al_2O_3 |composite interlayer FeNi42-Cu| - steel 15 joint. There the interlayer I, lying next to the ceramic element, was made of FeNi42 alloy, which has a low thermal coefficient of expansion, and the interlayer II of plastic material - copper. The thickness of both interlayers was 0,5 mm. In this case the thermal residual stress σ_{MAX} reached the value 181 MPa, and was lower about 80% then in the same joint, but without interlayer (878 MPa). The area of dangerous thermal stresses concentration was removed from ceramic/interlayer I bonding line, with relatively low strength, to the interlayer I/interlayer II bonding line possessing higher strength.