

ANALIZA MOŻLIWOŚCI POMIARÓW ROZSZERZALNOŚCI LINIOWEJ KOMPOZYTÓW O DUŻEJ PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ Z WYKORZYSTANIEM METOD ANALITYCZNYCH

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF LINEAR EXPANSION MEASUREMENTS ON COMPOSITES OF HIGH THERMAL CONDUCTIVITY USING ANALYTICAL METHODS

Rozszerzalność cieplna oraz liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej

Rozszerzalność cieplna to jedna z podstawowych własności fizycznych ciał polegająca na zmianie długości lub objętości pod wpływem zmian temperatury. Różna podatność ciał na zmiany temperatury wynika przede wszystkim z różnego rodzaju sił wiązań międzyatomowych jakie występują w tychże ciałach. Do opisu jakościowego zmian wymiarów ciała służą objętościowy oraz liniowy współczynnik rozszerzalności liniowej. Współczynnik rozszerzalności liniowej (CTE, *coefficient of linear thermal expansion*) odnosi się jedynie do ciał stałych, gdyż tylko im można przypisać długość. W wyniku różnego rodzaju zmian temperatury wymiary ciała stałego zmieniają się we wszystkich kierunkach. Współczynnik rozszerzalności liniowej przyjmować może wartości zarówno dodatnie, jak i ujemne w zależności od kierunku zmian temperatury. W ogólnym najbardziej oczywistym przypadku liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej definiuje się jako¹:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(T_1) * \Delta T},$$

gdzie $L(T_1)$ to długość ciała w temperaturze odniesienia, którą zazwyczaj jest temperatura otoczenia (około 20° C).

* Asystent, Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska.

¹ Sz. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna*, cz. I, wyd. II, Warszawa 1953.

Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej w przypadku ciał o własnościach anizotropowych

Jedna wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej w sposób jednoznaczny charakteryzuje go tylko w przypadku, gdy ma on charakter izotropowy. Inaczej sytuacja wygląda w przypadku monokryształów, w tym przede wszystkim o sieci heksagonalnej oraz tetragonalnej. Materiały te charakteryzuje między innymi anizotropowość strukturalna. Można w nich zaobserwować różne zmiany rozszerzalności termicznej dla różnych kierunków. Biorąc powyższe pod uwagę dla materiałów anizotropowych powinno podawać się przynajmniej dwie wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla dwóch głównych kierunków krystalograficznych. W przypadku sieci heksagonalnej oraz tetragonalnej obowiązuje następująca generalna zasada²:

$$\alpha_{\parallel c} > \alpha_{\perp c}, \text{ gdzie } c \text{ to wysokość komórki elementarnej}$$

Poniżej przedstawiona została tabela obrazująca wartości CTE dla różnych materiałów o własnościach anizotropowych²:

Tabela 1
Wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla materiałów anizotropowych

Materiał	Układ krystalograficzny	$\alpha, 10^{-6} K^{-1}$	
		$\alpha_{\parallel c}$	$\alpha_{\perp c}$
Diament	Regularny	2,5	2,5
Kwarc	Heksagonalny	9	14
Grafit	Heksagonalny	26	- 1,2
Antymon	Romboedryczny	15,6	8
Kalcyt	Romboedryczny	26	- 6

Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. Pieczonka, *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych*, Kraków 2010.

Znając wartości liniowych współczynników rozszerzalności dla dwóch podstawowych kierunków (jak wyżej) do osi c komórki elementarnej, można w prosty sposób określić wartość współczynnika dla dowolnego kierunku krystalograficznego³:

$$\alpha_{\downarrow} (= \alpha_{\parallel} + (\alpha_{\perp} - \alpha_{\parallel}) * \cos \square), \text{ gdzie } \square \text{ to dowolny kąt jaki tworzy dany badany kierunek krystalograficzny z osią } c \text{ komórki elementarnej.}$$

²T. Pieczonka, *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych*, Kraków 2010.

³S. V. Kidalov, F. M. Shakov, *Thermal Conductivity of Diamond Composites*, „Materials” 2009, nr 2, 2467–2495.

Zmienna wartość CTE w zależności o kierunku krystalograficznego jest przyczyną powstawania naprężeń strukturalnych w materiałach polikrystalicznych. Naprężenia ściskające oraz rozciągające pojawiają się na granicy różnie zorientowanych ziaren.

Analiza liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu typu miedź/diament

Liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej dla materiałów kompozytowych może zostać policzony za pomocą poniższego równania zaproponowanego przez Philipa S. Turnera³:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_1 * K_1 * \frac{F_1}{P_1} + \alpha_2 * K_2 * \frac{F_2}{P_2} + \dots}{K_1 * \frac{F_1}{P_1} + K_2 * \frac{F_2}{P_2} + \dots}$$

Innego rodzaju równanie zostało z kolei zaproponowane przez Edwarda H. Kenera³:

$$\alpha_c = \alpha_1 + V_2 * (\alpha_2 - \alpha_1) * \frac{K_1 * (3 * K_2 + 4 * G_1) + (K_2 - K_1) * (16 * G_1^2 + 12 * G_1 * K_2)}{(4 * G_1 + 3 * K_2) * [4 - V_2 * G_1 * (K_2 - K_1)] + 3 * K_1 * K_2 + 4 * G_1 * K_1}$$

Gdzie α objętościowy współczynnik CTE, K to moduł Helmholtza, F to ułamek wagowy, natomiast ρ to gęstość danego składnika, z kolei G to moduł Kirchhoffa.

Tabela 2

Zależność pomiędzy wydłużeniem względnym a temperaturą materiału⁴

Równanie	Autor
$\alpha_c = [\alpha_i^f * f * K_{i,f} + \alpha_m^f * (1 - f) * K_{m,f}] / [f * K_{i,f} + (1 - f) * K_{m,f}]$	Turner
$\alpha_c = [$	Kerner
$\alpha_c = \alpha_i^f * \alpha^{(1-f)}$	Thomas
$\alpha_c = \alpha_m - f * (\alpha_m - \alpha_i) *$	Tummala, Friedberg

Źródło: opracowanie własne na podstawie: E. Fidancevska, G. Ruseska, S. Zafirovski, B. Pavlovski, *Thermal-expansion and Mechanical Properties of the Ca10(PO4)6(OH)2-TiO2 Composite*, „Science of Sintering” 2002, nr 34, s. 241–246.

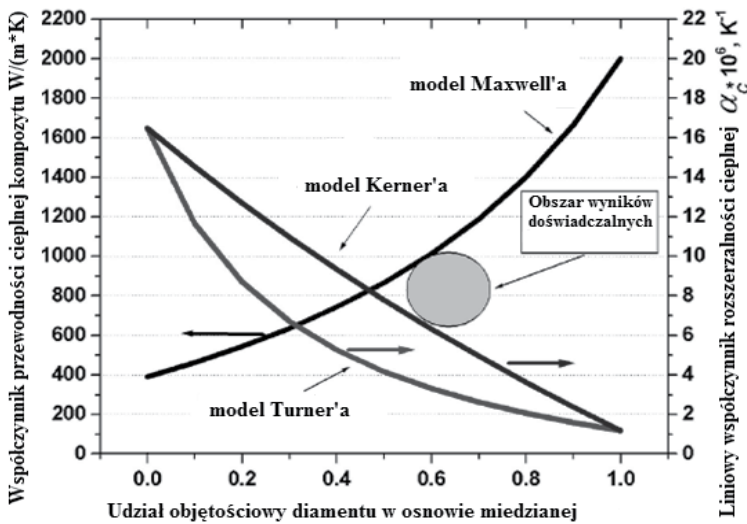
⁴E. Fidancevska, G. Ruseska, S. Zafirovski, B. Pavlovski, *Thermal-expansion and Mechanical Properties of the Ca10(PO4)6(OH)2-TiO2 Composite*, „Science of Sintering” 2002, nr 34, s. 241–246.

E to moduł Younga, ν to współczynnik Poissona, natomiast α to CTE z indeksem i dla fazy dyspersyjnej, z indeksem m dla lepiscza.

Poniżej przedstawiono wykres zmienności liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej określonego na podstawie równań zaproponowanych przez Turnera oraz Kerner'a. Wykres sporządzony został dla przykładowego kompozytu miedź/diament w zależności od udziału objętościowego diamentu w kompozycie⁵:

Rysunek 1

Zależność współczynnika CTE od udziału objętościowego diamentu w kompozycie miedź/diament według modeli Maxwella oraz Kerner'a



Źródło: opracowanie własne na podstawie: M. E. Brown, *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications*, Holandia 2001.

Analiza liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu o metalowej osnowie oraz komponencie konstrukcyjnym w postaci węgliku krzemu

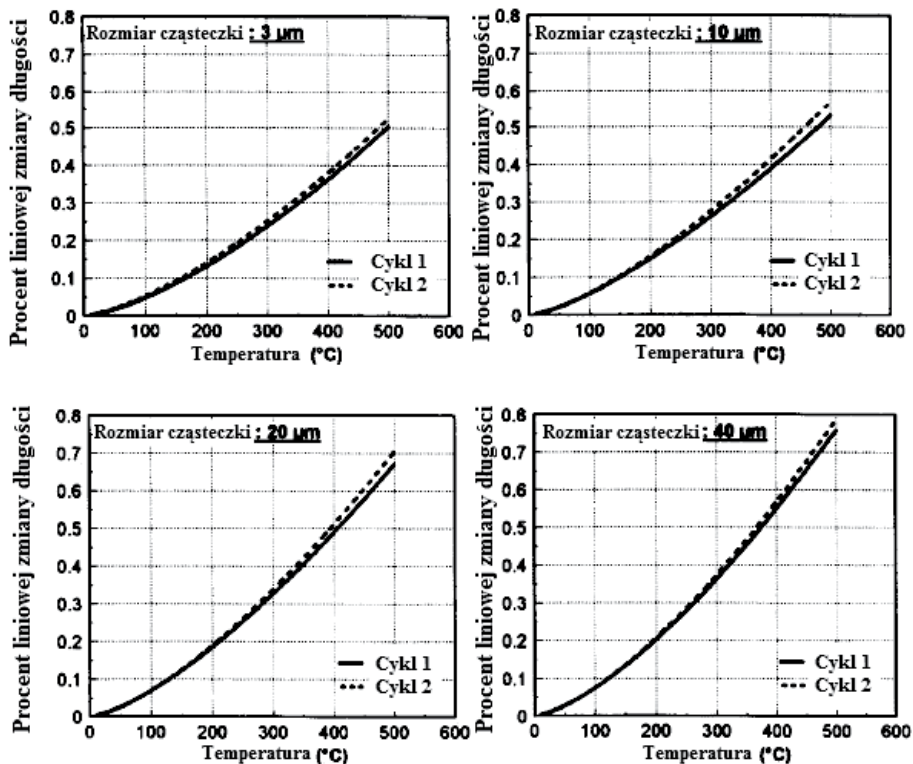
Pomiarów liniowego współczynnika dokonano w tym przypadku za pomocą urządzenia do termomechanicznej analizy TMA (w tym przypadku to model TMA 2940). W tym celu zostały przygotowane próbki o wymiarach 10 mm x 5 mm x 2 mm. Pomiar odbywał się w temperaturach od 25 do 500° C, z krokiem równym 5 stopniom. Rozszerzalność termiczna jest tu mierzona za pomocą czujnika przesuwów liniowych transformatorowego o układzie różnicowym z przesuwany rdzeniem. Następnie odpowiednie oprogramowanie analityczne załączone do

⁵M. E. Brown, *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications*, Holandia 2001.

analizatora typu TMA dokonuje obliczenia liniowego współczynnika CTE. Poniżej przedstawiono wyniki eksperymentu, w którym rozmiar cząsteczki odnosi się do rozmiaru utlenionych cząstek węgliku krzemu (SiC)⁶:

Rysunek 2

Zależność procentu liniowej zmiany długości cząstek węgliku krzemu od temperatury



Źródło: opracowanie własne na podstawie: S. Elomari, M. D. Skibo, A. Sundarraján, H. Richards, *Thermal expansion behavior of particulate metal-matrix composites*, „Composites Science and Technology” 1998, nr 58, s. 369–376.

Następnie dokonano porównania wyników otrzymanych eksperymentalnie za pomocą analizatora z teoretycznymi obliczeniami wykorzystującymi modele Kernerera, Schapery’ego oraz Turnera. Model Kernerera wygląda w tym przypadku następująco⁶:

$$\alpha_c = (\bar{\alpha}_+)_m \cdot \frac{K_p - K_m}{(1 - V_p) \cdot K_m + V_p \cdot K_m + (3 \cdot K_p \cdot \frac{K_m}{4} \cdot G_m)}$$

⁶ S. Elomari, M. D. Skibo, A. Sundarraján, H. Richards, *Thermal expansion behavior of particulate metal-matrix composites*, „Composites Science and Technology” 1998, nr 58, s. 369–376.

$$\bar{\alpha} = (1 - V_p) * \alpha_m - V_p * \alpha_p$$

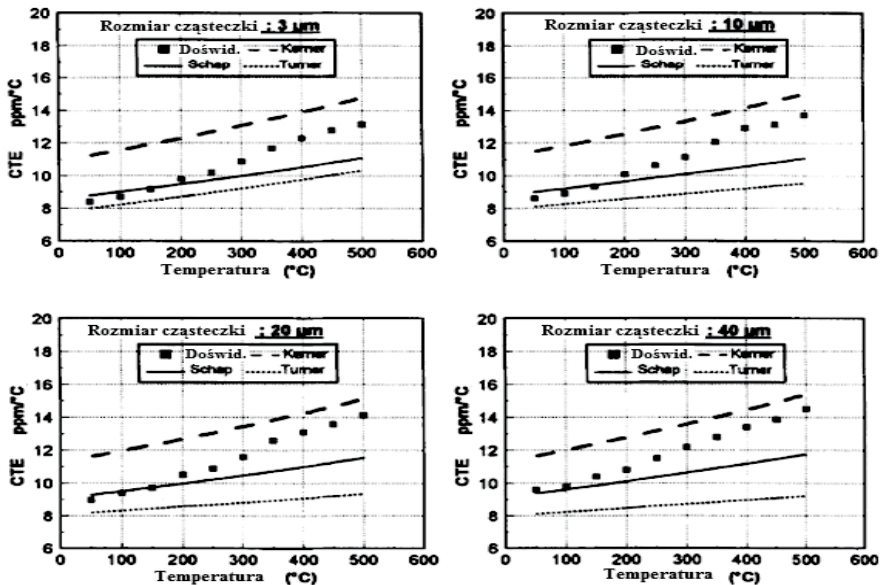
indeksy c, p oraz m odnoszą się odpowiednio do kompozytu, cząstek komponentu konstrukcyjnego oraz do osnowy. Według odpowiednio modelu Schapery’ego iTurnera⁶:

$$\alpha_c = \alpha_p + (\alpha_m - \alpha_p) * \frac{\left(\frac{1}{K_c}\right) - \left(\frac{1}{K_p}\right)}{\left(\frac{1}{K_m}\right) - \left(\frac{1}{K_p}\right)}, \quad \alpha_c = \frac{\sum_i^n \alpha_i * V_i * K_i}{\sum_1^n V_i * K_i}$$

Poniższe wykresy ilustrują porównania wyników otrzymanych drogą eksperymentalną z obliczeniami z wykorzystaniem odpowiednich modeli⁶:

Rysunek 3

Doświadczalne i analityczne wartości współczynnika CTE dla kompozytu typu metal/węglik krzemu



Źródło: opracowanie własne na podstawie: S. Elomari, M. D. Skibo, A. Sundarraján, H. Richards, *Thermal expansion behavior of particulate metal-matrix composites*, „Composites Science and Technology” 1998, nr 58, s. 369–376.

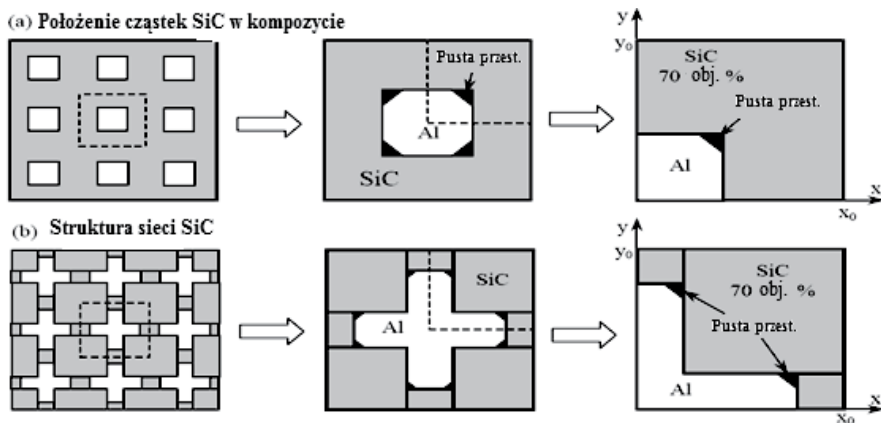
Powyższe wykresy pokazują, że najbliższym modelem teoretycznym pozwalającym na obliczenie liniowego współczynnika rozszerzalności jest w tym przypadku model Schapery'ego.

Analiza liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej za pomocą metody elementów skończonych

W opisaney niżej analitycznej metodzie materiałem badanym jest kompozyt o osnowie aluminiowej (AMC) oraz komponencie konstrukcyjnym z udziałem objętościowym w postaci 70% SiC. Analiza opierała się na numerycznym modelowaniu wartości CTE za pomocą metody elementów skończonych opartej na komórkach 2D. Metoda elementów skończonych została zastosowana w tym przypadku, gdyż modele Turnera, Kenera czy Schapery'ego nie uwzględniają wpływu pustych przestrzeni oraz wpływu na siebie cząstek komponentu konstrukcyjnego. Najpierw dokonano eksperymentalnego określenia wartości CTE dla odpowiednio przygotowanych próbek kompozytu za pomocą analizatora typu TMA 2940 CE. Do sporządzenia modelu numerycznego wykorzystano dwa modele pojedynczych komórek⁷.

Rysunek 4

Dwa modele pojedynczych komórek do analizy współczynnika CTE metodą elementów skończonych



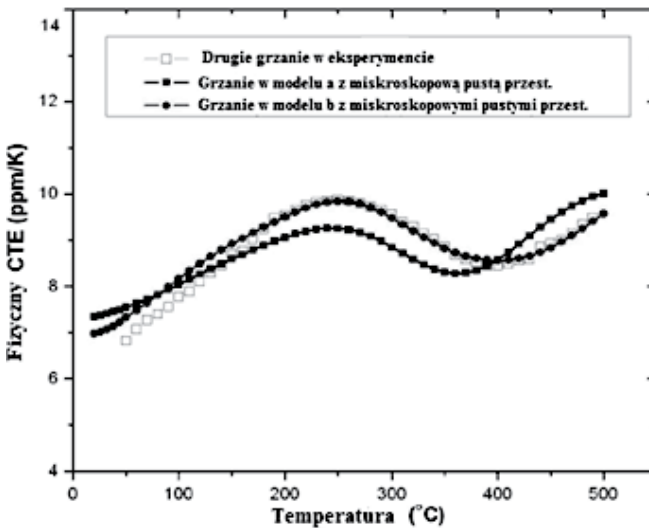
Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. H. Nam, G. Requena, H. P. Degischer, *Modelling and Numerical Computation of Thermal Expansion of Aluminium Matrix Composite with Densely Packed SiC Particles*, „Technische Mechanik” 2008, Band 28, Heft 3–4, s. 259–267.

⁷T. H. Nam, G. Requena, H. P. Degischer, *Modelling and Numerical Computation of Thermal Expansion of Aluminium Matrix Composite with Densely Packed SiC Particles*, „Technische Mechanik” 2008, Band 28, Heft 3–4, s. 259–267.

Niżej⁷ przedstawiono porównanie między wynikiem eksperymentalnym a modelami numerycznymi. Wyraźnie widać, że model b (komórka elementarna z mikroskopijnymi pustymi przestrzeniami) jest bardziej zbliżony do wyników otrzymanych z wykorzystaniem analizatora TMA. Wyniki analizy wskazują również na dużą zależność rozszerzalności termicznej od obecności w badanym kompozycie pustych przestrzeni oraz kontaktu pomiędzy cząstkami komponentu konstrukcyjnego.

Rysunek 5

Doświadczalne i numeryczne wartości współczynnika CTE dla kompozytu o osnowie aluminiowej i komponencie konstrukcyjnym w postaci węgliku krzemu



Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. H. Nam, G. Requena, H. P. Degischer, *Modelling and Numerical Computation of Thermal Expansion of Aluminium Matrix Composite with Densely Packed SiC Particles*, „Technische Mechanik” 2008, Band 28, Heft 3–4, s. 259–267.

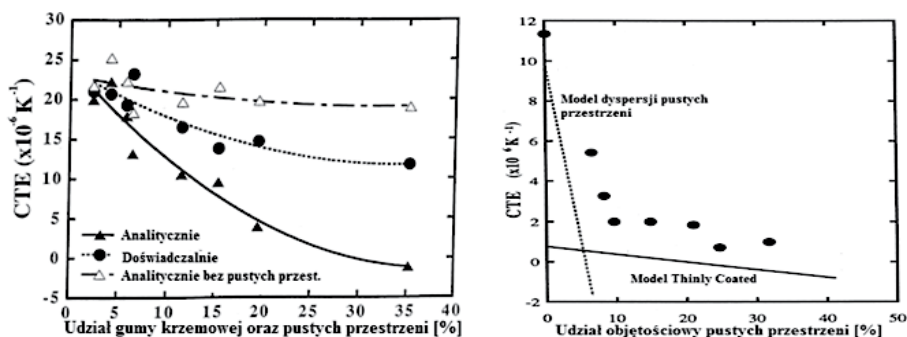
Wpływ obecności pustych przestrzeni w osnowie kompozytu na wartość liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej

W kolejnym doświadczeniu zbadano wpływ pustych przestrzeni w osnowie kompozytu epoksydowego na zmniejszenie współczynnika CTE. Do eksperymentu wykorzystano trzy analityczne modele. Pierwszym był model Eshelby’ego zmodyfikowany dla skończonej objętości frakcji wypełniacza. Drugim modelem był model „Thinly coated”, natomiast trzecim był model dyspersji pustych przestrzeni. Pierwszy model został zastosowany dla kompozytów z krótkimi włóknami oraz z pustymi przestrzeniami, kolejne dwa dla kompozytów 3D ciągłych również z pustymi przestrzeniami. Analizy wskazały na zmniejszenie liniowego współczynnika CTE wraz z pojawieniem się w osnowie kompozytu pustych przestrzeni. Dla

kompozytów o sferycznych cząstkach, podczas zwiększenia temperatury materiału niedopasowanie odkształceń poszczególnych faz kompozytu jest wywoływane. To prowadzi do powstawania pól naprężeń ciągliwych oraz ściskających w cząstkach sferycznych oraz osnowy. Wtedy jeżeli w osnowie występują puste przestrzenie poddawane one są naprężeniom ściskającym, co skutkuje zmniejszeniem ich objętości. Tym samym dochodzi do zmniejszenia całkowitego współczynnika CTE dla materiału. Naprężenia termiczne są większe dla kompozytów o krótkim włóknach aniżeli dla kompozytów z sferycznymi cząstkami. Z tego powodu dla tego typu materiału mechanizm opisany wyżej ma jeszcze większe znaczenie⁸.

Rysunek 6

Zależność współczynnika CTE od pustych przestrzeni w osnowie kompozytu epoksydowego



Źródło: opracowanie własne na podstawie: H. Hatta, T. Takei, M. Taya, *Effects of dispersed microvoids on thermal expansion behavior of composite materials*, „Materials Science and Engineering” 2000, A285, s. 99–110.

Dokładność modeli analitycznych różnego rodzaju w przypadku kompozytów typu metal-ceramika

Poniżej przedstawiono analityczne modele, które mogą służyć do oszacowania współczynnika CTE kompozytu typu metal-ceramika (Al₂O₃-NiAl) o własnościach izotropowych⁹. Eksperymentalny pomiar współczynnika miał w miejsce dla temperatur od 25 do 1200° C. Pomiar został wykonany analizatorem termomechanicznym (TMA, SETSYS 1600, SETARAM, France). Mierzona próbka miała wymiary 3 mm × 3 mm × 12 mm, a korekcja otrzymanego wyniku odbyła się poprzez zmierzenie współczynnika CTE urządzenia bez badanej próbki.

⁸ H. Hatta, T. Takei, M. Taya, *Effects of dispersed microvoids on thermal expansion behavior of composite materials*, „Materials Science and Engineering” 2000, A285, s. 99–110.

⁹ C. L. Hsieh, W. H. Tuan, *Thermal expansion behavior of a model ceramic-metal composite*, „Materials Science and Engineering” 2007, A460–461, s. 453–458.

Tabela 3

Zależności analityczne dla liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu typu metal/ceramika

Model	Formuła
Turner	$\alpha_c = \frac{\alpha_m * V_m * K_m + \alpha_p * V_p * K_p}{V_m * K_m + V_p * K_p}$
Kerner	$\alpha_c = \alpha_p * V_p + \alpha_m * V_m + V_p * V_m * (\alpha_p - \alpha_m) * \frac{K_p - K_m}{V_m * K_m + V_p * K_p + 3 * K_m * \frac{K_p}{4} * G_m}$
Schapery	$\alpha_c = \alpha_p + (\alpha_m - \alpha_p) * \frac{\left(\frac{1}{K_c}\right) - \left(\frac{1}{K_p}\right)}{\left(\frac{1}{K_m}\right) - \left(\frac{1}{K_p}\right)}$
Schapery (granice)	$\alpha_c^u = \alpha_p * V_p + \alpha_m * V_m + \frac{4 * G_m * (K_c - K_p) * (\alpha_m - \alpha_p) * V_p}{K_c * (4 * G_m + 3 * K_p)}$
	$\alpha_c^l = \alpha_p * V_p + \alpha_m * V_m + \frac{4 * G_p * (K_c - K_m) * (\alpha_p - \alpha_m) * V_p}{K_c * (4 * G_p + 3 * K_m)}$
Rosen-Hashin (granice)	$\alpha_c^u = \alpha_p * V_p + \alpha_m * V_m + \frac{4 * G_p * V_p * V_m * (K_m - K_p) * (\alpha_m - \alpha_p)}{K_m * 3 * K_p + 4 * G_p * \bar{K}}$
	$\alpha_c^l = \alpha_p * V_p + \alpha_m * V_m + \frac{4 * G_m * V_p * V_m * (K_m - K_p) * (\alpha_m - \alpha_p)}{K_m * 3 * K_p + 4 * G_m * \bar{K}}$
Levin-H-S (granice)	$\alpha_c^u = \frac{(4 * G_m + 3 * K_m) * (\alpha_m - \alpha_p) * V_p * K_p}{(4 * G_m + 3 * K_p) * K_m + 4 * (K_p - K_m) * G_m * V_p}$
	$\alpha_c^l = \frac{(4 * G_p + 3 * K_p) * (\alpha_p - \alpha_m) * V_m * K_m}{(4 * G_p + 3 * K_m) * K_p + 4 * (K_m - K_p) * G_p * V_m}$

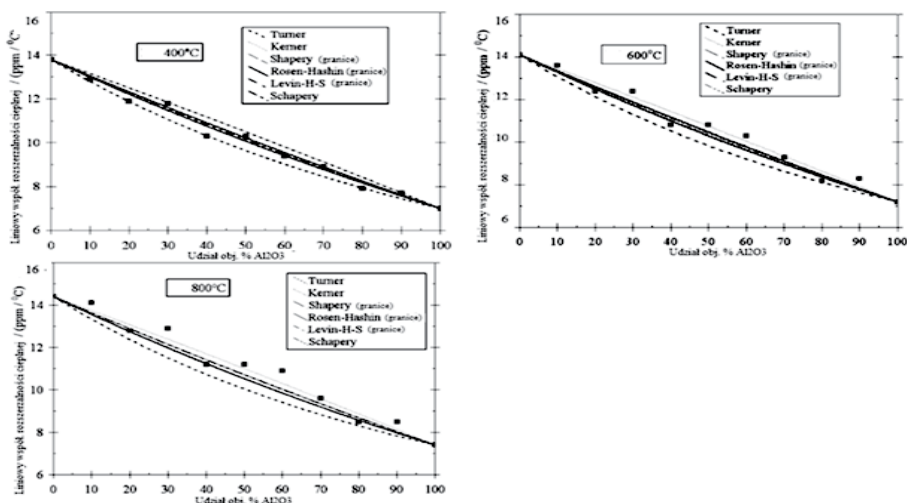
Źródło: opracowanie własne na podstawie: C. L. Hsieh, W. H. Tuan, *Thermal expansion behavior of a model ceramic-metal composite*, „Materials Science and Engineering” 2007, A460-461, s. 453-458.

E to moduł sprężystości, G to moduł Kirchhoffa, K to moduł Helmholtza, V objętość frakcji, c kompozyt, m osnowa, p to komponent konstrukcyjny, u to górna granica, l to dolna granica.

Poniższe wykresy porównują wartości eksperymentalnych i analitycznych współczynnika CTE dla temperatury powyżej 400° C. Model Kenera oraz Turnera jako jedyne w sposób dokładny mogą być używane jak odpowiednio górna oraz dolna granica wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla badanego kompozytu⁹:

Rysunek 7

Porównanie wartości eksperymentalnych i analitycznych współczynnika CTE dla temperatury powyżej 400° C dla kompozytu typu metal/ceramika



Źródło: opracowanie własne na podstawie: C. L. Hsieh, W. H. Tuan, *Thermal expansion behavior of a model ceramic-metal composite*, „Materials Science and Engineering” 2007, A460-461, s. 453-458.

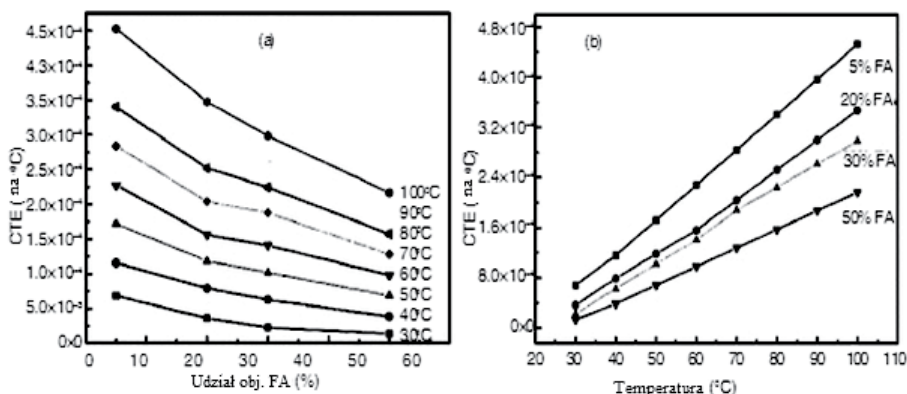
Zależności liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu HDPE/FA od udziału objętościowego pyłów lotnych. Model analityczny określający zależność liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej od temperatury

W opisanym niżej doświadczeniu przedstawiono zależność objętościowego udziału pyłów lotnych FA (niebezpiecznych dla środowiska) w kompozytach o osnowie wykonanej z polietylenu o dużej gęstości HDPE. Zbadano zmianę liniowego współczynnika CTE dla udziału objętościowego pyłów lotnych znajdującego się w granicach od 0 do 50 procent. Jak można zauważyć z wykresu zamieszczone-

go niżej, wraz z wzrostem udziału FA dochodzi do zmniejszenia współczynnika CTE. Natomiast wraz ze wzrostem temperatury wartość liniowego współczynnika rośnie liniowo¹⁰:

Rysunek 8

Zależności liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu HDPE/FA od udziału objętościowego pyłów lotnych oraz temperatury



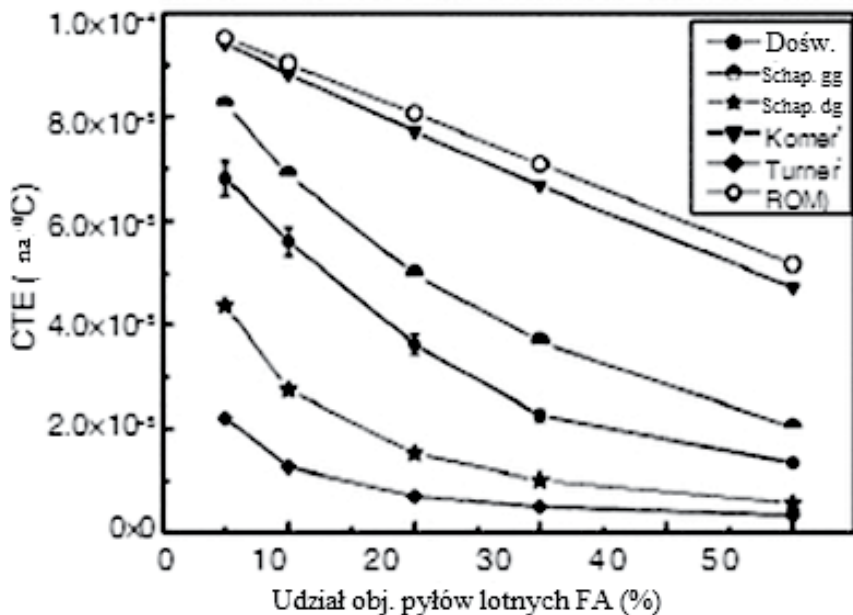
Źródło: opracowanie własne na podstawie: S. Baglari, K. Madhusree, T. K. Dey, *Effective thermal conductivity and coefficient of linear thermal expansion of high-density polyethylene – fly ash composites*, Indian J. Phys., 2011, vol. 85, nr 4, s. 559–573.

Jak już wspomniano, istnieje kilka modeli analitycznych określających wartość liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytów. W opisywanej analizie zostały wzięte pod uwagę modele ROM, Kerner’a, Turnera oraz Schapery’ego. W modelu ROM zakłada się, że osnowa jest cieczą, natomiast dokładność modelu zależy od rozszerzalności każdej fazy. Model Kerner’a zakłada z kolei sferyczności substancji zbrojącej oraz perfekcyjne przyleganie na granicy przylegania faz. Model Turnera mówi o podejściu równych odkształceń oraz braku restrykcji w stosunku do kształtu substancji zbrojącej. Z kolei model Schapery’ego zmodyfikowany przez Hashin’a tłumaczy granice na efektywnej rozszerzalności cieplnej izotropowych oraz anizotropowość kompozytów składających się z izotropowych faz, wykorzystując zasady ekstremum termosprężystości. Większość z tych modeli, jak pokazuje wykres niżej, w sposób mało dokładny określa współczynnik CTE dla badanego kompozytu, przede wszystkim z racji nie uwzględniania faktów takich jak na przykład oddziaływanie pomiędzy fazami kompozytu, niehomogeniczność odkształceń¹⁰.

¹⁰ S. Baglari, K. Madhusree, T. K. Dey, *Effective thermal conductivity and coefficient of linear thermal expansion of high-density polyethylene – fly ash composites*, Indian J. Phys., 2011, vol. 85, nr 4, s. 559–573.

Rysunek 9

Analityczne zależności liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu HDPE/FA od udziału objętościowego pyłów lotnych oraz temperatury



Źródło: opracowanie własne na podstawie: S. Baglari, K. Madhusree, T. K. Dey, *Effective thermal conductivity and coefficient of linear thermal expansion of high-density polyethylene – fly ash composites*, Indian J. Phys., 2011, vol. 85, nr 4, s. 559–573.

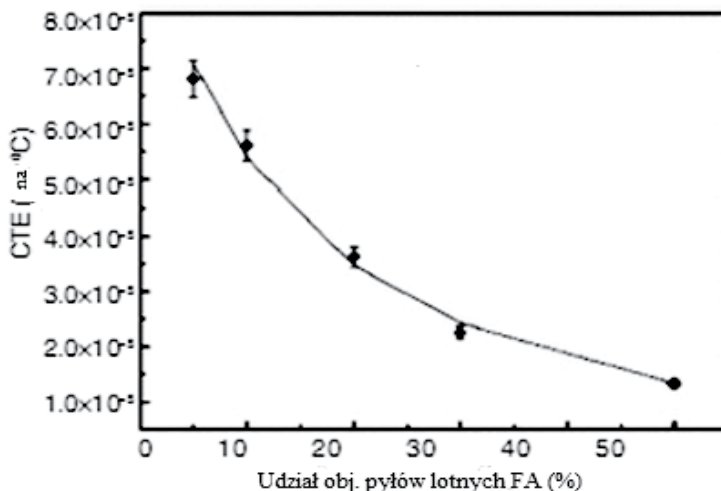
Na kompleksowe oddziaływanie pomiędzy osnową a komponentem konstrukcyjnym ma zazwyczaj wpływ kilka czynników, takich jak: rozmiar, kształt oraz typ substancji zbrojącej, jak również chemiczna struktura osnowy oraz objętość połączenia faz. Elementy te zostały wzięte pod uwagę w zamieszczonej niżej zależności, gdzie reprezentują siłę oddziaływania pomiędzy osnową a komponentem konstrukcyjnym, natomiast jest miarą zależności temperaturowej współczynnika, to udział objętościowy warstwy osnowy:

$$\alpha_c = \frac{1}{1 + K_O * \phi * \phi_m} * \phi * \alpha_f + * \phi_m * \alpha_m + K_O * \phi * \phi_m * (\alpha_f + \alpha_m) + K_O * \phi * \phi_m * \frac{K_1}{3}$$

Poniższy wykres obrazuje porównanie wyniku eksperymentalnego zmiany współczynnika CTE z zamieszczoną powyżej zależnością analityczną. Jak można zauważyć zależność ta jest bardzo zbliżona do danych otrzymanych z eksperymentu¹⁰:

Rysunek 10

Porównanie eksperymentalnych oraz analitycznych wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytu HDPE/FA w zależności od udziału objętościowego pyłów lotnych



Źródło: opracowanie własne na podstawie: S. Baglari, K. Madhusree, T. K. Dey, *Effective thermal conductivity and coefficient of linear thermal expansion of high-density polyethylene – fly ash composites*, Indian J. Phys., 2011, vol. 85, nr 4, s. 559–573.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd możliwości analizy rozszerzalności cieplnej dla różnego rodzaju materiałów, w tym dla kompozytów o dużej przewodności cieplnej. Metody analityczne dla różnych przypadków charakteryzują się różnymi wynikami, o wielorakim stopniu dokładności. Chodzi tu o modele Turnera, Kernerera, Schapery’ego, czy też innych. Możliwym jest również zastosowanie metody elementów skończonych. W analizie zamieszczono szereg uwag dotyczących wpływu różnego rodzaju czynników na wyniki analiz. Dzięki nim analiza może być przeprowadzana w sposób świadomy, dokładny, dopasowany do danej specyficznej sytuacji. Analiza wyników może dzięki nim być przeprowadzona w sposób kompetentny oraz prowadzący do wartościowych wniosków. Warto zaznaczyć, że opisane metody mają wiele zalet, ale również każda posiada jakieś określone wady. Dobór odpowiedniej metody powinien być przede wszystkim uzależniony od rodzaju badanej próbki, jak też od środowiska badawczego, możliwości technicznych pracowni badawczej oraz celów analizy. Istnieje również możliwość korzystania z wyników już przeprowadzonych badań, w których dane modele oraz metody były bardziej dokładne aniżeli inne.

BIBLIOGRAFIA

- Baglari S., Madhusree K., Dey T. K. 2011.** *Effective thermal conductivity and coefficient of linear thermal expansion of high-density polyethylene-fly ash composites.* Indian J. Phys., vol. 85, nr 4, s. 559–573.
- Brown M. E. 31. 12. 2001.** *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications.* Springer, Holandia.
- Elomari S., Skibo M. D., Sundarrajan A., Richards H. 1998.** *Thermal expansion behavior of particulate metal-matrix composites.* „Composites Science and Technology”, nr 58, s. 369–376.
- Fidancevska E., Ruseska G., Zafirovski S., Pavlovski B. 2002.** *Thermal-expansion and Mechanical Properties of the $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2-TiO_2$ Composite.* „Science of Sintering”, nr 34, s. 241–246.
- Hatta H., Takei T., Taya M. 2000.** *Effects of dispersed microvoids on thermal expansion behavior of composite materials.* „Materials Science and Engineering” A285, s. 99–110.
- Hsieh C. L., Tuan W. H. 2007.** *Thermal expansion behavior of a model ceramic–metal composite.* „Materials Science and Engineering” A460–461, s. 453–458.
- Kidalov S. V., Shakov F. M. 2009.** *Thermal Conductivity of Diamond Composites.* „Materials”, nr 2, s. 2467–2495.
- Nam T. H., Requena G., Degischer H. P. 2008.** *Modelling and Numerical Computation of Thermal Expansion of Aluminium Matrix Composite with Densely Packed SiC Particles.* „Technische Mechanik”, Band 28, Heft 3–4, s. 259–267.
- Pieczonka T. 2010.** *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych.* Kraków.
- Szczeniowski Sz. 1953.** *Fizyka doświadczalna, cz. I, wyd. II, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.*

STRESZCZENIE

Przedmiotem opracowania jest analiza możliwości pomiarów rozszerzalności liniowej kompozytów o dużej przewodności cieplnej z wykorzystaniem metod analitycznych. W pierwszej części analizy przedstawiony został liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej, w tym również w odniesieniu do materiałów kompozytowych o dużym współczynniku przewodzenia ciepła. Następnie w pracy zaprezentowano szereg metod analizy rozszerzalności liniowej dla kompozytów, w tym o dużej przewodności cieplnej. Opracowanie zawiera bardzo szeroki zakres przedstawionych metod, co może być bardzo cenne z punktu widzenia osób lub ośrodków zainteresowanych badaniem rozszerzalności liniowej, w szczególności kompozytów o dużej przewodności cieplnej.

SŁOWA KLUCZOWE: rozszerzalność cieplna, liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej, metody analityczne, kompozyty

SUMMARY

The purpose of the study is analysis of possibility of linear expansion measurements on composites of high thermal conductivity using analytical methods. First part of the analysis presents the linear coefficient of thermal expansion, also in relation to composite materials with high thermal conductivity. Then, the paper presents, a number of analytic methods of analysis of linear expansion of composites, also with a high thermal conductivity. The study contains a very wide range of presented methods, which can be very valuable in terms of scientists or institutions interested in the study of linear expansion, in particular composites with high thermal conductivity.

KEYWORDS: thermal expansion, linear coefficient of thermal expansion, analytical methods, composites