



## Efekty cieplne w procesie dynamicznego niszczenia kompozytów polimerowych

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ BOGUSZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,  
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2,  
sochelski@wat.edu.pl, pbogusz@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki doświadczalnych badań wpływu prędkości uderzenia na przyrost temperatury na powierzchni próbki. Podczas badań energochłonnych elementów kompozytowych następuje wzrost temperatury próbki, który jest zależny od prędkości uderzenia. Wzrost temperatury jest spowodowany tarciami cząsteczek niszczonej próbki i tarciami próbki o podporę maszyny wytrzymałościowej. W pracy [1] przeprowadzono badania dotyczące rozpraszania energii poprzez tarcie, podczas progresywnego niszczenia kompozytowych rurek, pomiędzy płytami o różnej chropowatości, natomiast nie dokonywano pomiaru temperatury próbek.

W pracy podjęto próbę określenia wpływu prędkości obciążenia na temperaturę powierzchni niszczonej próbki. Przeprowadzono badania termowizyjne elementów energochłonnych, które wykonano z kompozytów polimerowych o różnym rodzaju wzmocnienia i o różnej strukturze. Badaniom dynamicznym z pomiarem temperatury poddano próbki wykonane z kompozytów epoksydowych wzmocnionych matą szklaną, które mają wysokie właściwości lepko-sprężyste, a także kompozyty wzmocnione włóknami szklanymi i węglowymi o strukturze  $[(0/90)_T]_n$ , w których dominują właściwości sprężyste. Przy dużych prędkościach obciążenia, wzrost temperatury na powierzchni próbek był znacznie większy od temperatury mięknięcia żywicy epoksydowej.

**Słowa kluczowe:** właściwości mechaniczne, efekt cieplny, energia absorbowana, kompozyty polimerowe, mechanika doświadczalna, badania dynamiczne

### 1. Wstęp

Kompozyty polimerowe wykorzystywane są do wytwarzania konstrukcji energochłonnych. Materiały te wykazują korzystny współczynnik energii absorbowanej odniesiony do masy. Wadą żywic polimerowych używanych powszechnie jako

materiał osnowy kompozytów jest fakt, że mają one w porównaniu z metalami bardzo ograniczoną wytrzymałość w podwyższonych temperaturach. W trakcie procesu niszczenia w elemencie energochłonnym generuje się ciepło, które może spowodować znaczny wzrost temperatury. Może to mieć wpływ na wartość zaabsorbowanej energii, ponieważ właściwości mechaniczne żywic polimerowych zależą od temperatury.

W pracy [1] Fairfull i Hull przedstawili wyniki badań, dotyczące wpływu tarcia, podczas progresywnego niszczenia kompozytowych rurek pomiędzy płytami o różnej chropowatości. Stwierdzono, że energia rozpraszana w wyniku tarcia w strefie niszczenia oraz pomiędzy próbką a podporą maszyny wytrzymałościowej stanowi znaczną część całkowitej energii absorbowanej podczas niszczenia. Autorzy sugerują, że tarcie w strefie niszczenia wytwarza ciepło i może być powodem zmiany EA wraz ze wzrostem prędkości niszczenia. W pracy wyznaczono współczynnik tarcia pomiędzy podporą stalową maszyny wytrzymałościowej a kompozytową próbką, który wynosi  $\mu \approx 0,35$ , jednak nie dokonywano pomiarów temperatury próbki podczas niszczenia.

W pracy [2] przedstawiono badania dla próbek z kompozytów epoksydowych, w wyniku których otrzymano podobną wartość współczynnika tarcia  $\mu = 0,32 \pm 0,03$ .

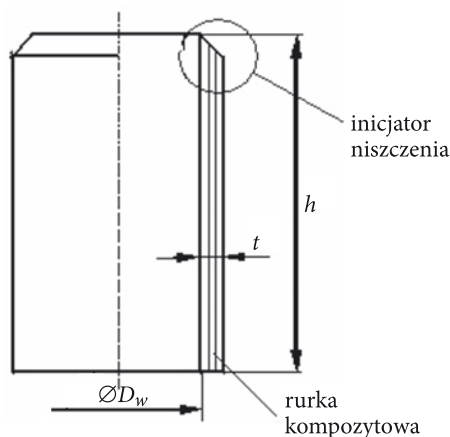
W niniejszej pracy przeprowadzono pomiary rozkładu temperatury na powierzchni próbek kompozytowych podczas prób energochłonności. W tym celu wykorzystano kamerę termowizyjną, którą zainstalowano przed stanowiskiem do badań energochłonnych. Pomiaru temperatury dokonano przy różnych prędkościach obciążenia. Na podstawie wyników badań określono zależność temperatury maksymalnej od prędkości obciążenia.

Do pomiaru temperatury zastosowano kamerę termowizyjną, ponieważ inne metody pomiaru temperatury (termopary oraz termistory) charakteryzują się bardzo dużą bezwładnością cieplną. Duża bezwładność cieplna urządzeń pomiarowych dyskwalifikuje ich użycie w badaniach przy dużych prędkościach obciążenia. Kamera termowizyjna pozwala na pomiar temperatury na całej powierzchni próbki widocznej w obiektywie kamery, podczas gdy pomiar termoparą jest tylko lokalny. W literaturze nie znaleziono prac poświęconych badaniom temperatury niszczonego kompozytów za pomocą użytej w niniejszej pracy metody.

## 2. Materiały i metody badań

Badaniom dynamicznym przy zmiennej wartości prędkości obciążenia poddano próbki w kształcie tulejek wykonane z żywicy epoksydowej EPIDIAN E53 o różnych rodzajach wzmocnienia: tkanina szklana marki STR-012-350-110 firmy Krosoglass, o gramaturze  $350 \text{ g/m}^2$  i strukturze  $[(0/90)_T]_n$  (S/E); włókna cięte w postaci maty szklanej o gramaturze  $316 \text{ g/m}^2$  (mS/E); włókna węglowe w postaci tkaniny marki ECC 442 z włókien TENAX HTA 5131 o strukturze  $[(0/90)_T]_n$  (C/E).

Próbki miały średnicę wewnętrzną 40 mm i wysokość 50 mm. Wykonano próbki o grubość ścianki od 1,5 do 5 mm. Na jednej z krawędzi wykonano ścięcia pod kątem 45° spełniające funkcję inicjatora niszczenia, które zapewniają progresywne niszczenie próbek. Kształt i wymiary badanych próbek przedstawiono na rysunku 1.



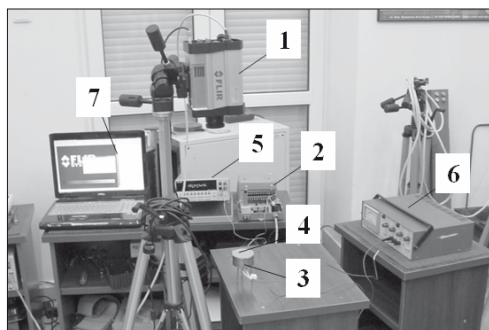
Rys. 1. Schemat tulejki kompozytowej używanej w badaniach energochłonnych

Podstawowe właściwości mechaniczne badanych kompozytów podano w pracy [3]. Próby energochłonne przeprowadzono w zakresie prędkości od 0,0007 do 6,0 m/s. Ze względu na szeroki zakres prędkości obciążenia konieczne było wykorzystanie dwóch różnych stanowisk badawczych. Część badań wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 8802, a badania dynamiczne przy największej prędkości obciążenia wykonano na sprężynowym młocie udarowym produkcji własnej (o zakresie energii uderzenia do 17 kJ).

Przed przystąpieniem do badań termowizyjnych wyznaczono emisyjność cieplną każdego z badanych kompozytów. Emisyjność cieplna jest cechą charakterystyczną danego materiału zależną od bardzo wielu czynników, np.: od rodzaju materiału, stanu powierzchni, temperatury.

Stanowisko pomiarowe do wyznaczania współczynnika emisyjności cieplnej badanych kompozytów przedstawiono na rysunku 2. W jego skład wchodziły: 1) kamera termowizyjna FLIR SC3600; 2) termostat z zimnym końcem termopar; 3) urządzenie grzewcze; 4) kompozytowe próbki z zainstalowaną termoparą; 5) cyfrowy miernik napięcia; 6) zasilacz prądu stałego (do 50 V); 7) komputer rejestrujący wskazania kamery termowizyjnej.

Współczynnik emisyjności obliczony został na podstawie pomiarów temperatury termoparą i kamerą termowizyjną, przy zastosowaniu programu ThermaCAM Research Pro2.9 i wynosił: dla kompozytu C/E — 0,827 i dla kompozytu S/E — 0,868.



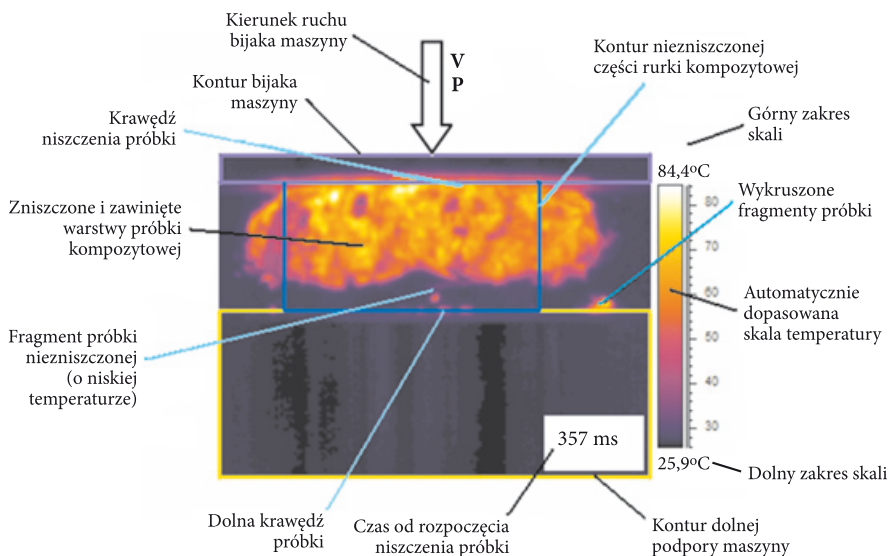
Rys. 2. Zdjęcie stanowiska pomiarowego służącego do wyznaczania współczynnika emisyjności cieplnej

Kamera termowizyjna rejestrowała sekwencję zdjęć z częstotliwością zależną od prędkości obciążenia. Dla badań na młocie udarowym częstość wykonywania zdjęć wynosiła 900 Hz. Oprogramowanie sterujące kamerą umożliwiało odczyt cyfrowy temperatury maksymalnej lub średniej z wybranego obszaru obrazu. W trakcie analizy zdjęć zaznaczano obszar próbki (wraz ze zniszczonymi warstwami) i odczytywano temperaturę maksymalną na każdej klatce filmu do momentu zakończenia próby. Spośród odczytanych na wszystkich klatkach filmu dla danej próbki temperatur maksymalnych  $T_{\max}^*$  wybierano globalną temperaturę maksymalną  $T_{\max}$ . Następnie obliczano średnią arytmetyczną z trzech testów przeprowadzonych dla danego typu próby (prędkość obciążenia i rodzaj struktury próbki). Obliczano przyrost temperatury  $\Delta T$  zgodnie ze wzorem:

$$\Delta T = T_{\max} - T_0, \quad (1)$$

gdzie  $T_0$  jest to temperatura otoczenia.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe zdjęcie zarejestrowane przez kamerę termowizyjną FLIR podczas badań energochłonnych próbki kompozytowej. Na zdjęciu kolorowymi obwiedniami zaznaczono elementy stanowiska: podpórę dolną maszyny, bijak i próbkę kompozytową. Zaznaczono strzałką i symbolami kierunek wektora prędkości bijaka względem próbki, który jednocześnie definiuje zwrot działania siły obciążającej. Kolorowa skala pokazana z prawej strony ujęcia dobierana jest automatycznie do zakresu temperatur wykrytych przez kamerę. U dołu i u góry skali znajdują się wartości graniczne temperatur. W prawym dolnym rogu umieszczany jest czas, jaki upłynął od momentu rozpoczęcia niszczenia próbki. Warto zauważyć, że niezniszczony fragment próbki ma niską temperaturę (zbliżoną do temperatury otoczenia). Wzrost temperatury rejestrowany jest na powierzchni próbki w strefie jej niszczenia. Dlatego też warstwy kompozytu, które uległy zniszczeniu i zostały wygięte na zewnątrz próbki lub wykruszyły się od próbki w postaci małych fragmentów, mają temperaturę wysoką. Największą wartość temperatury próbka osiąga, według wskazań kamery, na powierzchni zniszczonych warstw



Rys. 3. Opis zdjęcia niszczenia próbki kompozytowej uzyskanego z kamery termowizyjnej

kompozytu tuż pod górną krawędzią niszczonej próbki lub bezpośrednio na niej. Na rysunku 3 dodatkowo zaznaczono dolną i górną krawędź próbki.

W tabeli 1 przedstawiono oprócz opisu rodzaju i struktury kompozytu, następujące dane: wartości temperatury maksymalnej (dla całego procesu niszczenia)  $T_{max}$ , grubość ścianki  $t$  tulejki, wartości temperatury początkowej  $T_0$ , a także maksymalny przyrost temperatury  $\Delta T$  obliczony ze wzoru (1). Rozrzut wyników był mały, co wykazano w [4].

TABELA 1

Wyniki badań termowizyjnych próbek kompozytowych

Rodzaj i struktura kompozytu	$V_{pocz}$ [m/s]	$t$ [mm]	$T_0$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
S/E [0/90] <sub>T</sub>	0,0007	1,5	27,1	34,3	7,2
S/E [0/90] <sub>T</sub>	0,06	1,5	27,1	79,1	52,0
S/E [0/90] <sub>T</sub>	4,4	1,5	25	114,0	89,0
S/E [0/90] <sub>T</sub>	0,0007	2,5	26,8	38,4	11,6
S/E [0/90] <sub>T</sub>	0,06	2,5	26,9	90,1	63,2
S/E [0/90] <sub>T</sub>	6,0	2,5	25	151,3	126,3
mata S/E	0,0007	2,3	27,1	38,1	11,0
mata S/E	0,06	2,3	26,6	70,4	43,8
mata S/E	5,9	2,3	24,4	117,1	92,7

cd. tabeli 1

mata S/E	0,0007	4,5	26,5	44,4	17,9
mata S/E	0,06	4,5	27	76,3	49,3
mata S/E	7,0	4,5	24,9	140,3	115,4
C/E [0/90] <sub>T</sub>	0,0007	1,5	26,9	42,5	15,6
C/E [0/90] <sub>T</sub>	0,06	1,5	27,1	96,0	68,9
C/E [0/90] <sub>T</sub>	4,4	1,5	26,2	146,7	120,5
C/E [0/90] <sub>T</sub>	0,0007	2,0	27,1	40,7	13,6
C/E [0/90] <sub>T</sub>	0,06	2,0	26,9	93,9	67,0
C/E [0/90] <sub>T</sub>	6,3	2,0	25	152,0	127,0
C/E [0/90] <sub>T</sub>	0,0007	3,0	26,9	45,4	18,5
C/E [0/90] <sub>T</sub>	0,06	3,0	26,9	101,6	74,7
C/E [0/90] <sub>T</sub>	7,3	3,0	25,7	192,0	166,3

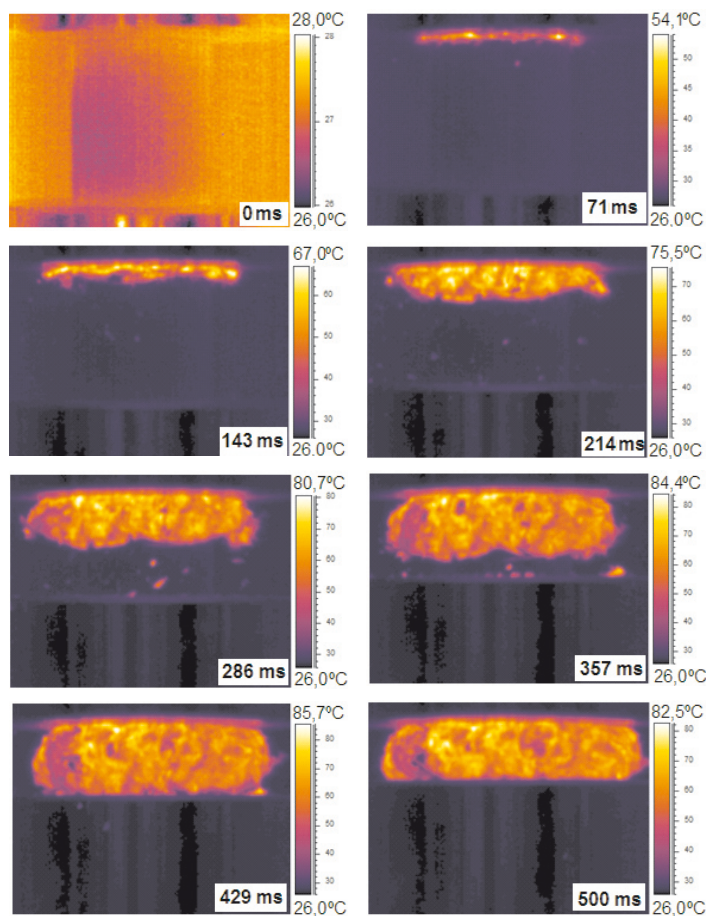
Przykładową sekwencję zdjęć zarejestrowaną przez kamerę FILR zobrazowano na rysunku 4. Pokazane zdjęcia ilustrują przebieg zmian rozkładu temperatury na powierzchni wraz z rozwojem procesu progresywnego niszczenia próbki S/E badanej przy prędkości obciążenia 0,06 m/s. Przedstawiona próbka o masie 22 g została zniszczona na długości 30 mm i zaabsorbowała energię równą 702 J. Badania te przeprowadzono na maszynie Instron.

Na rysunku 5 przedstawiono ilustracje procesu niszczenia progresywnego próbki C/E przy prędkości obciążenia 7,5 m/s. Długość części zniszczonej próbki wynosiła 28,5 mm, masa próbki — 26 g. Próbka zaabsorbowała energię 790 J. Badania tej próbki przeprowadzono na młocie udarowym.

Należy zaznaczyć, że zdjęcia pokazane na rysunku 4 wykonywano kamerą obróconą o 90°, ze względu na ograniczone warunki instalacji kamery. Kontury stanowiska i próbki przedstawiono na pierwszym zdjęciu.

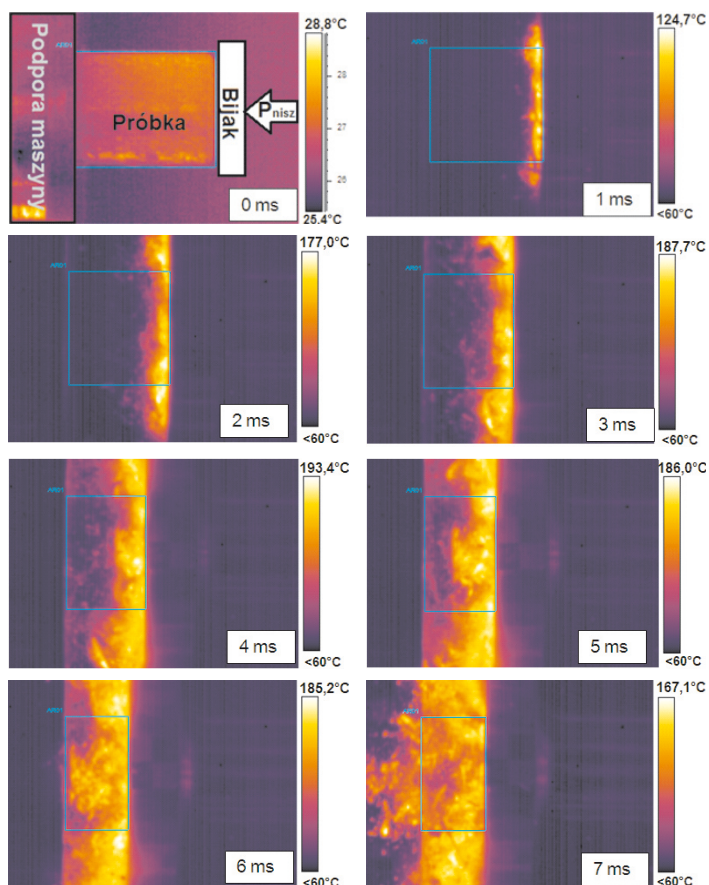
Na rysunku 6 przedstawiono przebieg temperatury maksymalnej  $T^*_{\max}$  (maksymalnej zarejestrowanej w danej chwili czasowej) w funkcji czasu dla próbki, której sekwencje obrazów termowizyjnych przedstawiono na zdjęciach z rysunku 4. Wykonano wykres w przedziale od początku niszczenia próbki do czasu 20 ms. Warto zauważyć, że sam proces niszczenia trwał około 7 ms (ostatnie zdjęcie na rysunku 4). Po kolejnych 13 ms temperatura maksymalna zniszczonej próbki obniżyła się od temperatury 200 do 115°C, a po czasie 0,6 s maksymalna temperatura spadła do 71°C. Dość szybki spadek temperatury maksymalnej po zakończeniu próby energochłonnej świadczy o powierzchniowym charakterze zjawiska wzrostu temperatury w czasie niszczenia. W wyniku tarcia podpory maszyny o warstwy niszczonej próbki wydziela się ciepło, które lokalnie prowadzi do znacznego przyrostu temperatury kompozytu.



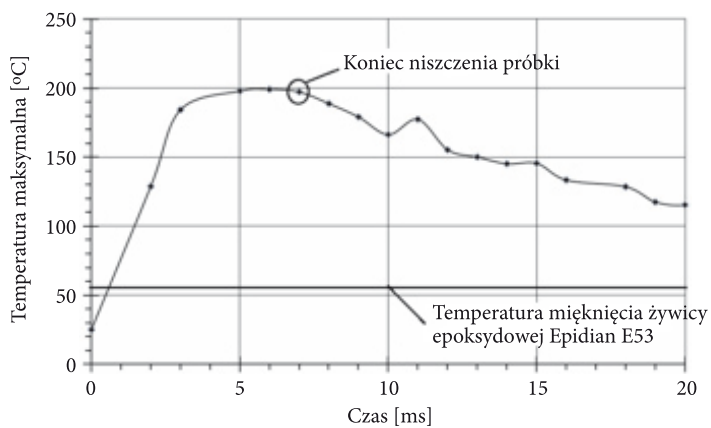


Rys. 4. Przykładowa sekwencja zdjęć zarejestrowana przez kamerę FLIR dla kompozytu S/E przy prędkości 0,06 m/s

Na podstawie wyników pomiaru temperatury podczas badań energochłonnych próbek sporządzono wykresy oddziaływania prędkości obciążenia na wartość temperatury maksymalnej. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań dla rurek z kompozytów epoksydowych wzmacnianych tkaniną węglową. Na rysunku 8 pokazano wyniki badań dla kompozytów epoksydowych wzmocnionych tkaniną szklaną. Na obydwu wykresach przedstawiono wyniki dla próbek o różnej grubości ścianek. Wartości przyrostu temperatury obliczono ze wzoru (1). Stwierdzono, że temperatura maksymalna jest liniową funkcją prędkości niszczenia, jednak zaznacza się nieliniowy wpływ grubości ścianki. Przy zmianie prędkości obciążenia w zakresie 0,0007 do 0,6 m/s grubość ścianki praktycznie nie wpływa na wzrost temperatury próbki. Niewielkie różnice w odczycie temperatury spowodowane są rozrzutem wyników. Niszczeniu tulejki C/E o grubości ścianki 3 mm z dużą prędkością obciążenia

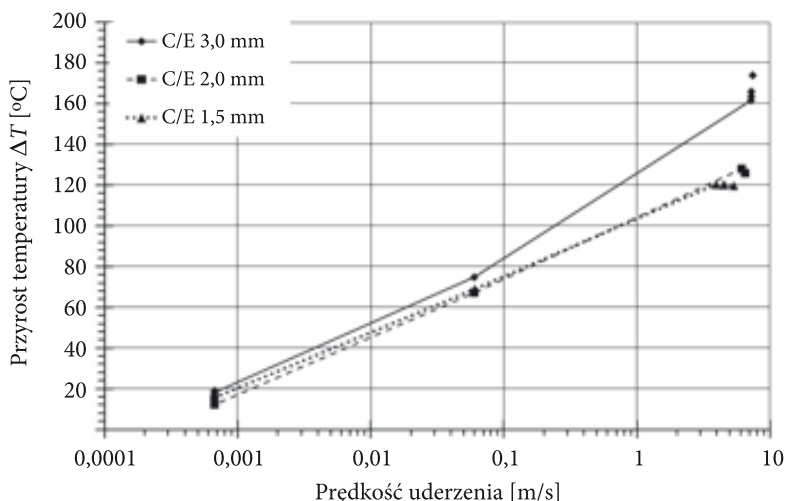


Rys. 5. Przykładowa sekwencja zdjęć zarejestrowana przez kamerę FLIR dla kompozytu C/E przy prędkości 7,5 m/s

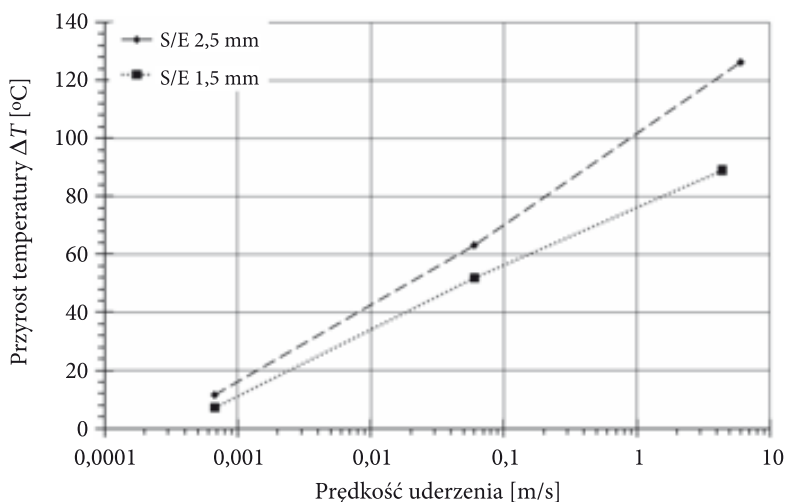


Rys. 6. Przebieg temperatury w funkcji czasu dla próbki przedstawionej na zdjęciach na rysunku 4





Rys. 7. Wpływ prędkości obciążenia na przyrost temperatury próbek z kompozytów C/E o różnej grubości ścianki rurki



Rys. 8. Wpływ prędkości obciążenia na przyrost temperatury dla próbek z kompozytów S/E o różnej grubości ścianki rurki

towarzyszy wzrost temperatury maksymalnej o 166°C (patrz tab. 1). Tłumaczy się to większą ilością zniszczonych cząsteczek biorących udział w procesie tarcia o podporę maszyny podczas progresywnego niszczenia. Zginane grubsze warstwy kompozytu podczas niszczenia mają większą sztywność i stawiają większy opór podporze maszyny podczas niszczenia, co powoduje zwiększenie siły tarcia.

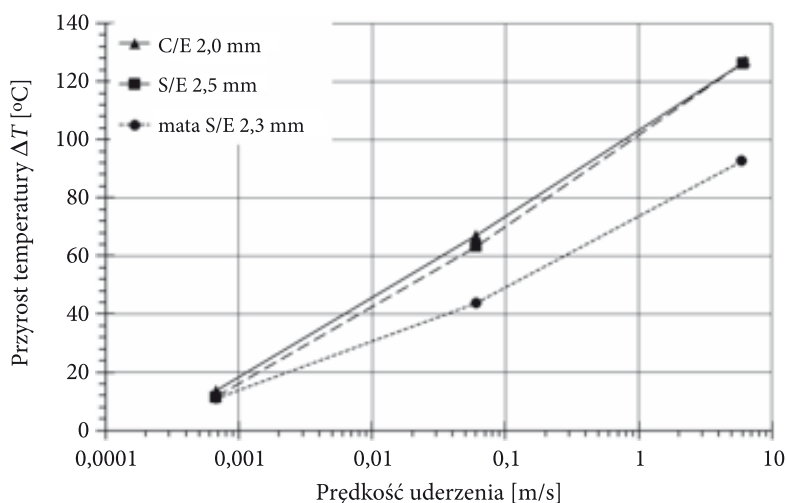
Należy zauważyć, że żywica epoksydowa Epidian E53 ma małą odporność na wysokie temperatury, na co wskazują jej właściwości, a w szczególności niska

temperatura mięknięcia określona w metodzie Martensa. Wynosi ona 50-55°C i zaznaczono ją poziomą linią ciągłą na rysunku 6.

Przy dużych prędkościach obciążenia, wzrost temperatury na powierzchni próbki jest większy od temperatury mięknięcia żywicy, i nawet lokalny może mieć wpływ na wartość siły niszczącej, a za tym i energię absorbowaną przez próbkę. W pracy [4] wykazano spadek EA dla kompozytów epoksydowych wzmocnionych tkaniną węglową  $[(0/90)_T]_n$ , w przedziale prędkości 0,0007-9,0 m/s, co tłumaczy się wpływem wysokiej temperatury na proces niszczenia.

Celowe jest zastosowanie w konstrukcjach energochłonnych żywic o podwyższonych własnościach cieplnych.

Przykładową zależność przyrostu temperatury od rodzaju kompozytu w zależności od prędkości obciążenia, dla tulejek o grubości ścianki 2-2,5 mm, przedstawiono na rysunku 9. Dokonano porównania kompozytów epoksydowych wzmocnionych matą szklaną, tkaniną szklaną i tkaniną węglową. Na wykresach podano punkty danych dla prędkości: 0,0007; 0,06 i około 6 m/s.



Rys. 9. Wpływ prędkości obciążenia na przyrost temperatury dla próbek z kompozytów epoksydowych o różnym rodzaju wzmocnienia o grubości ścianki 2-2,5 mm

Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że wartość temperatury maksymalnej w czasie niszczenia tulejki znacznie zależy od prędkości, a mniej od rodzaju kompozytu. Przy dużej prędkości obciążenia temperatura kompozytu szklanego o grubości ścianki 2,5 mm wzrasta o ponad 126°C. Dla kompozytu węglowego o grubości ścianki 2 mm zanotowano średni wzrost temperatury o zbliżoną wartość 127°C.

W przypadku kompozytów epoksydowych wzmocnianych matą szklaną siła niszcząca jest stosunkowo mała, co powoduje znacznie mniejszy przyrost temperatury na powierzchni próbki.

## 5. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że:

1. Wzrost prędkości niszczenia próbek z kompozytów epoksydowych wzmocnianych: tkaniną węglową, tkaniną szklaną i matą szklaną powoduje znaczne zwiększenie temperatury maksymalnej na powierzchni niszczonych tulejek.
2. W przypadku kompozytów epoksydowych wzmocnianych matą szklaną siła niszcząca jest stosunkowo mała, co powoduje znacznie mniejszy przyrost temperatury na powierzchni próbki, niż w przypadku pozostałych badanych kompozytów.
3. Głównymi czynnikami wpływającym na duży przyrost temperatury jest duża prędkość obciążenia oraz słaba przewodność cieplna kompozytu.
4. Żywica epoksydowa Epidian E53 ma małą odporność na wysokie temperatury, na co wskazują jej właściwości, a w szczególności niska temperatura mięknięcia określona w metodzie Martensa, która wynosi 50-55°C. Celowe jest zastosowanie w konstrukcjach energochłonnych żywic o podwyższonych własnościach cieplnych.
5. Spadek EA w przedziale prędkości 0,0007-9,0 m/s wykazany w pracy [4], dla kompozytów epoksydowych wzmocnionych tkaniną węglową  $[(0/90)_T]_n$  tłumaczy się wpływem wysokiej temperatury na proces niszczenia. Wnioskuje się, że przy dużych prędkościach obciążenia wzrost temperatury na powierzchni próbki jest większy od temperatury mięknięcia żywicy, i nawet lokalny ma wpływ na spadek siły niszczącej próbkę, a więc i spadek energii absorbowanej.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.11.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2011 r.

### LITERATURA

- [1] A. H. FAIRFULL, D. HULL, *Energy absorption of polymer matrix composite structure: frictional effects*, Structural Failure, 1989, 521-545.
- [2] J. M. BABBAGE, P. K. MALLICK, *Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminium-composite hybrid tubes*, Composite Structure, 70, 2005, 177-184.
- [3] S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI, *Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites*, Composite Structures, 20 February 2008.
- [4] P. BOGUSZ, *Wpływ prędkości uderzenia oraz rodzaju wypełnienia kompozytowych struktur energochłonnych na zdolność pochłaniania energii*, rozprawa doktorska, Wydawnictwo WAT, Warszawa, 2010.

S. OCHELSKI, P. BOGUSZ

### Heat effects in dynamic crush of polymer composites

**Abstract.** The paper presents the experimental results of loading rate influence on the temperature rise on the surface of polymer composites. The investigations showed that during the progressive crush of composite elements, the temperature of the specimen rises significantly, dependently on the loading rate. This effect is mainly caused by friction of composite molecules and friction between bended composite layers and the strength machine. In work [1], the investigations concerned the energy dissipation in progressive crush of composite tubes by a friction effect between composite material and steel plates with different surface roughness. In this case, the temperature was not measured.

This work deals with the investigation of temperature growth on the surface of the composite energy absorbing elements in the shape of a tube. The dynamic tests were performed on polymer composites with different reinforcement orientation (different viscoelastic properties). Specimens made of epoxy resin reinforced with glass mat are characterized by strong viscoelastic properties. Composites reinforced with glass and carbon fabrics  $[(0/90)_T]_n$  have mainly elastic properties.

The temperature field was measured by the infrared high speed camera. In high speed impact tests, the temperature was significantly higher than the melting temperature of the epoxy resin.

**Keywords:** mechanical properties, heat effects, absorbed energy, polymer composites, experimental mechanics, dynamic investigations