

J. Ranachowski, Z. Ranachowski
A. Zaboklicki

POMIARY EMISJI AKUSTYCZNEJ (EA)
W TRAKCIE LASEROWEJ
OBRÓBKI CERAMIKI

28/1994

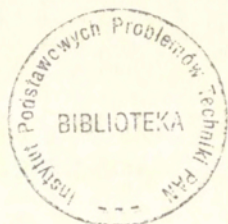
P. 269



WARSZAWA 1994

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 11 października 1994 r.



56621



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 0,5 Ark. druk. 0,75
Oddano do drukarni w październiku 1994 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

<http://rcin.org.pl>

POMIARY EMISJI AKUSTYCZNEJ (EA) W TRAKCIE LASEROWEJ OBROBKI CERAMIKI

STRESZCZENIE

W pracy opisano wyniki pomiarów emisji akustycznej generowanej w trakcie naświetlania laserem trzech materiałów ceramicznych. W analizie wyników wyróżniono dwa zakresy obciążenia termicznego materiału: nie wywołujący makroskopowych zmian strukturalnych oraz wywołujący lokalne przetopienie i rozwój rys. W obu zakresach porównano energię sygnału EA generowanego przez wiązkę lasera w badanych strukturach ceramicznych, charakteryzujących się różnymi współczynnikami absorpcji promieniowania. Ponadto przedstawiono sposób obliczania energii emisji akustycznej rejestrowanej w procesie obciążania próbki ceramicznej szokiem termicznym.

WPROWADZENIE

W trakcie obróbki powierzchni elementów ceramicznych przy użyciu lasera materiał ceramiczny podlega znaczącym szokom termicznym. W przypadku przekroczenia krytycznego poziomu mocy lasera w materiale występują dwa zjawiska:

- lokalne przetopienie ceramiki
- rozwój rys w trakcie procesu ochładzania w objętości znacznie większej niż pole poddane ekspozycji na naświetlanie.

Pierwsze z tych zjawisk występuje przy nowoczesnych metodach obróbki ceramiki (cięcie, toczenie) i ze względu na lokalny charakter może nie obniżać wytrzymałości mechanicznej całego elementu poddanego naświetlaniu. Natomiast rozwój rys objętościowych powoduje krytyczne obniżenie wytrzymałości mechanicznej całego elementu.

Teoretyczny model zjawiska powstawania rys przy szokach cieplnych w ceramice podano w [1] i [2]. Krytyczna różnica temperatur ΔT_c , powodująca rozwój pęknięcia Griffitha o długości początkowej l_0 jest przedstawiana zależnością:

$$\Delta T_c = \left(\frac{2\gamma_f}{\pi\alpha^2 E_o l_0} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 2\pi N l_0^2)$$

gdzie: γ_f - powierzchniowa energia pęknięcia

α - współczynnik rozszerzalności cieplnej

E_o - moduł sprężystości materiału dla $N=0$

N - ilość pęknięć Griffitha o długości początkowej l_0

Zjawisko wzrostu rysy od długości l_0 do długości l_1 może być śledzone za pomocą detekcji emisji akustycznej pochodzącej z badanego elementu ceramicznego. Przez emisję akustyczną rozumie się tutaj powstawanie fali sprężystej w trakcie powiększania się rysy. Stwierdzono bowiem, że pomiędzy intensywnością emisji akustycznej a prędkością wzrostu rysy da/dt istnieje zależność proporcjonalna [3]:

$$dN/dt \approx 1/G_m (da/dt)$$

gdzie: dN/dt - liczba przekroczeń umownego poziomu przez sygnał EA (zliczenia EA)

G_m - parametr struktury (średnia wielkość ziarna)

Aby ocenić praktyczne możliwości śledzenia rozwoju rys w ceramice w wzniku szoków cieplnych, autorzy pracy przeprowadzili cykl eksperymentów opisanych poniżej.

OPIS EKSPERYMENTÓW

Badano trzy rodzaje ceramiki: A) azotek krzemu Si_3N_4 B) węgiel krzemu SiC oraz tlenek glinu Al_2O_3 . Z powyższych materiałów zostały wykonane krążki o średnicy 40 mm i grubości ok. 8 mm. Laserowemu naświetlaniu poddawana była płaska powierzchnia krążków, poddana uprzednio polerowaniu i czyszczeniu.

Do naświetlania użyto lasera NdYAg, pracującego w zakresie podczerwieni. W trakcie eksperymentów moc promieniowania zmieniano w zakresie 50 - 1000 W, natomiast czas ekspozycji w zakresie 10 ms - 1 s. Średnica wiązki na powierzchni ceramiki wznosiła ok. 1.1 mm. Należy zaznaczyć, że w trakcie eksperymentów nie występowały problemy z zakłóceniami elektrycznymi i akustycznymi pochodzącymi od lasera (był on oddalony o ok. 25 m, a energia promieniowania przesyłana była za pomocą światłowodu).

Promień lasera naświetlał próbkę ceramiczną pionowo z góry, natomiast od spodu do próbki był przymocowany piezoelektryczny sensor EA za pomocą sprężyny dociskowej. Sensor był typu rezonansowego (500 kHz) z ceramiką $BaTiO_4$ o średnicy 15 mm. Do przetwornika dołączony był szerokopasmowy przedwzmacniacz o wzmocnieniu napięciowym 40 dB i szumach własnych odniesionych do wejścia nie przekraczających 7.5 μV RMS.

Na stanowisku operatora umieszczony był właściwy analizator EA, połączony z przedwzmacniaczem kilkumetrowym kablem koncentrycznym. Zbudowany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki analizator EA charakteryzował się następującymi parametrami:

1. wzmocnienie 41 dB + 40 dB przedwzmacniacz
2. zliczanie przekroczeń progu IV
3. zliczanie przekroczeń progu IV z jednoczesnym grupowaniem sygnałów z czasem 50 μs (ang. events counting)
4. pomiar wartości skutecznej sygnału w paśmie 25 kHz - 1 MHz
5. pomiar wartości skutecznej sygnału w ustalonych przedziałach czasu (4 ms)
6. cyfrowa postać danych 2,3,4,5. była co 4 ms transmitowana do komputera IBM 386/33 MHz, a po pomiarze zapisywana na dysku sztywnym

Ze względu na to, że głównym celem poniższej publikacji jest prezentacja czułości zapisu sygnałów EA towarzyszących procesowi laserowego naświetlania ceramiki, zostaną niżej przedstawione dane dotyczące energii rejestrowanych sygnałów. Energię tą wyznaczono poprzez wyliczenie sumy kwadratów wartości skutecznej sygnału mierzonego na sensorze EA. Przyjęto, że robocza impedancja na wejściu analizatora EA wynosi 10k Ω , stąd moc chwilowa EA rejestrowana przez analizator wynosi

$$P = (U_{RMS})^2 / 10 \text{ k}\Omega.$$

Badane próbki były naświetlane wiązką promieniowania o takiej energii, która nie wywoływała znaczącego podniesienia temperatury całej próbki. Kolejne punkty poddane naświetlaniu były od siebie oddalone o 3.5 mm.

WYNIKI

Przy omówieniu zależności: energia rejestrowana przez sensor EA - energia wiązki lasera zostaną rozpatrzone dwa przypadki (I): zakres mocy, gdzie nie rejestrowano procesów przetapiania materiału oraz (II): zakres mocy, gdzie obserwowano powstanie strefy przetapiania.

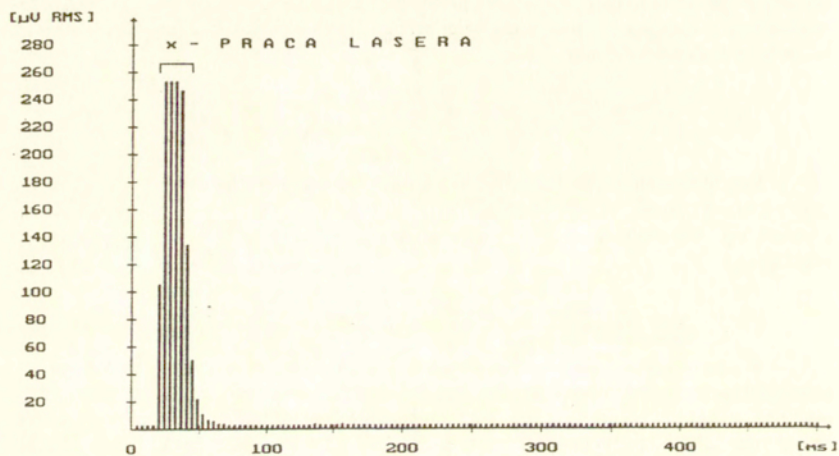
Omówienie zakresu I

W pierwszym zakresie naświetlania z mocą nie powodującą powstania strefy przetapiania rejestrowany sygnał EA miał dla badanych trzech typów ceramiki typowy przebieg, pokazany na rys. 1., 2. i 3. Na tych rysunkach przedstawione jest napięcie skuteczne na sensorze EA (jednostki umowne) w funkcji czasu. Jako "x" oznaczono czas pracy lasera. W trakcie tego czasu sensor EA rejestruje duże natężenie sygnału EA, powodowane efektem trwającego szoku cieplnego. Po wyłączeniu lasera energia sygnału EA maleje wykładniczo, podobnie jak w naświetlanych próbkach metalowych, co było opisane w [3].

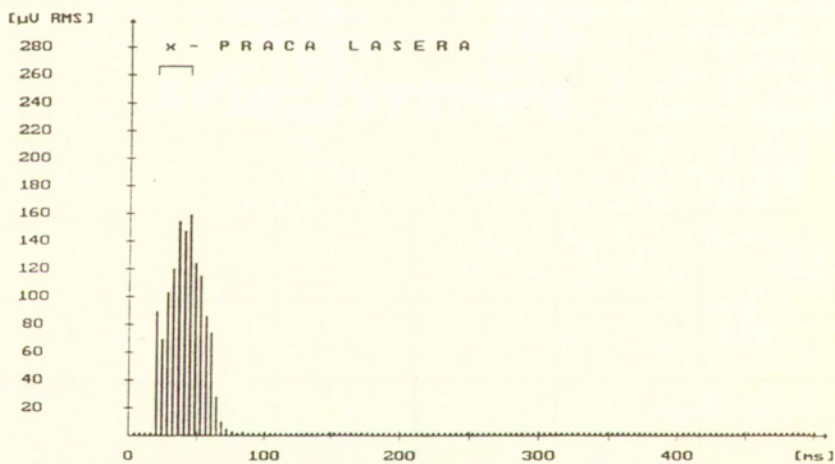
Interesujące jest wyliczenie zależności rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu w zależności od poziomu energii tego impulsu. Czas trwania impulsu wynosił w tym przypadku 25 ms, natomiast moc lasera zmieniała się od 50 do 200 W.

Tabela 1. Zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu od poziomu energii tego impulsu. Materiał: SiC

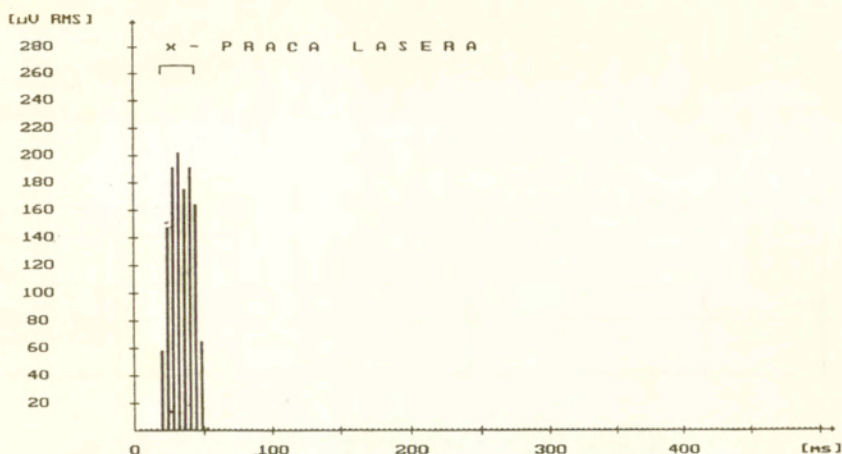
energia impulsu lasera	[J]	1.25	2.5	5	10
energia EA w trakcie impulsu	..[pJ]	0.03	0.067	0.073	0.087
energia EA w trakcie i po wyłączeniu impulsu	..[pJ]	0.033	0.070	0.073	0.120



Rys. 1. Aktywność akustyczna próbki z SiC , moc lasera - 200 W, czas naświetlania 25 ms.



Rys. 2. Aktywność akustyczna próbki z Al_2O_3 , moc lasera - 200 W, czas naświetlania 25 ms.



Rys. 3. Aktywność akustyczna próbki z Si_3N_4 , moc lasera - 200 W, czas naświetlania 25 ms.

Tabela 2. Zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu od poziomu energii tego impulsu. Materiał: Si_3N_4

energia impulsu lasera	[J]	1.25	2.5	5	10
energia EA w trakcie impulsu	..[pJ]	0.0004	0.003	0.040	0.082
energia EA w trakcie i po wyłączeniu impulsu	..[pJ]	0.0004	0.003	0.051	0.122

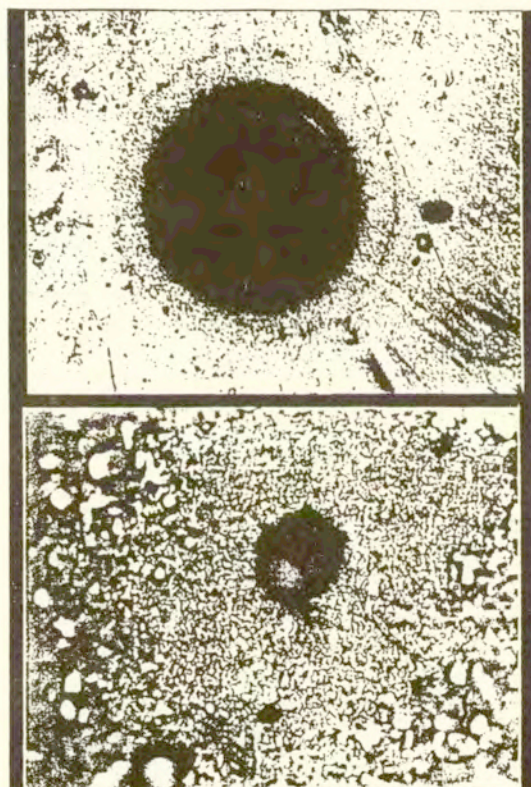
Tabela 3. Zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu od poziomu energii tego impulsu. Materiał: Al_2O_3

energia impulsu lasera	[J]	1.25	2.5	5	10
energia EA w trakcie impulsu	..[pJ]	0.0002	0.010	0.020	0.011
energia EA w trakcie i po wyłączeniu impulsu	..[pJ]	0.0002	0.019	0.039	0.037

W poniższej tabeli przedstawiono zależność innego parametru - zliczeń przekroczeń progu IV przez sygnał EA. Parametr ten zależy od użytej mocy lasera oraz od rodzaju ceramiki.

Tabela 4. Zależność rejestrowanych zliczeń EA w trakcie trwania impulsu od mocy lasera i rodzaju ceramiki

material	Si ₃ N ₄	SiC	Si ₃ N ₄	SiC	Si ₃ N ₄	SiC
energia impulsu [W]	200	200	400	400	800	800
zliczenia EA	682	1110	2186	2990	5891	6461



Rys. 4. Zdjęcia mikroskopowe strefy przetopionej w SiC. Powiększenie 30 X (na gorze) oraz 200 X (na dole)

Z porównania energii promieniowania lasera i rejestrowanej energii akustycznej wynika, że (uwzględniając zbliżone temperatury topnienia badanych tworzyw) - najwyższy współczynnik absorpcji posiadał SiC, a najniższy Al_2O_3 . Ze wzrostem energii promieniowania rośnie absorbowana energia akustyczna, lecz zależność tych wielkości ma charakter nieliniowy. Czas wybrzmiewania sygnału EA po wyłączeniu lasera, będący miarą sprężystości badanych materiałów jest zbliżony dla Si_3N_4 i SiC, natomiast jest znacznie dłuższy dla Al_2O_3 , co uwidoczniło na rys. 1., 2 i 3. W przypadku Al_2O_3 całkowita energia rejestrowanego sygnału EA jest dwukrotnie większa niż energia EA rejestrowana w trakcie pracy lasera. W SiC (materiale o wysokiej absorpcji użytego promieniowania) już przy stosunkowo niskich, kilkudziesięciu energiami impulsu rozpoczynają się procesy rozwoju defektów strukturalnych, co na wykresach EA jest rejestrowane jako dodatkowe piki energetyczne po wyłączeniu lasera por. [4].

Omówienie zakresu II

Nasświetlanie trzech badanych materiałów w zakresie I, obejmującym niewielkie moce lasera nie powodowało widocznych makroskopowo zmian na ich powierzchni. Przekroczenie ok 10 J dla SiC i 20 J dla Si_3N_4 powodowało lokalne przetopienie tych materiałów do głębokości poniżej 1 mm oraz uszkodzenia powierzchni w strefie szerszej niż wiązka lasera.

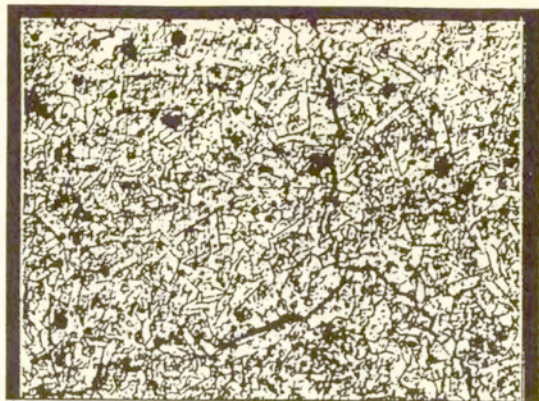
Przykład strefy przetopionej w SiC, nasświetlany 20 ms mocą 1000 W, w powiększeniu 30 X oraz 200 X (mikroskop optyczny), jest pokazany na rys. 4. W lewej części dolnego zdjęcia widoczna jest powstała rysa, biegnąca od ziarna SiC. Struktura SiC wraz z rysą, powiększona 1000 X jest pokazana na rys. 5. Typowe wykresy aktywności akustycznej dla SiC i dla Si_3N_4 pokazano na rys. 6. i 7. W obu przypadkach aktywność akustyczna nasświetlanych próbek trwała znacznie dłużej niż czas trwania impulsu laserowego. Interesujące jest wystąpienie drugiego maksimum sygnału EA. Pierwsze maksimum jest związane z procesem relaksacji naprężeń w trakcie pracy lasera, natomiast drugie z procesami rekrytalizacji i towarzyszącym im rozwojem rys. W przypadku Si_3N_4 akustyczne rekrytalizacyjne maksimum sygnału EA występuje znacznie później (do kilkudziesięciu ms opóźnienia) niż w przypadku SiC (5 - 20 ms opóźnienia). Może to być skutkiem różnych wartości współczynnika przewodności cieplnej tych materiałów.

W tabeli 5 porównano energie sygnału EA odpowiadające procesom rekrytalizacyjnym, liczone od momentu wyłączenia lasera. Laser emitował moc 1000 W, regulacji podlegał czas trwania nasświetlania

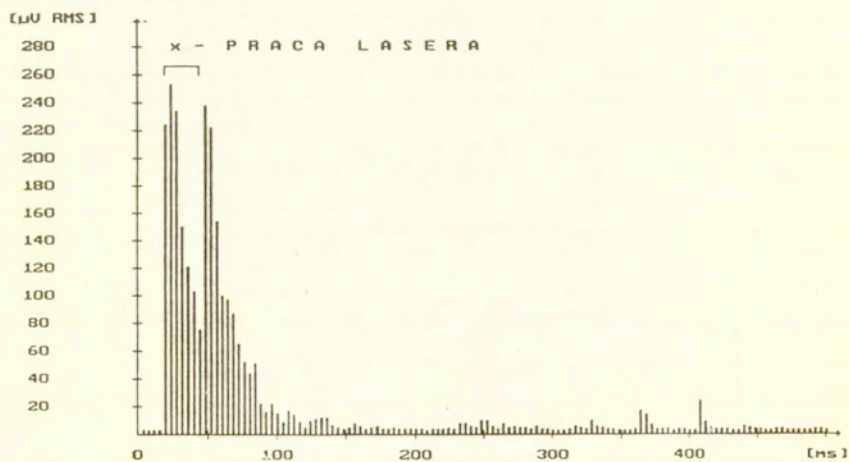
Tabela 5 Energia akustyczna sygnału EA, odpowiadająca procesom rekrytalizacyjnym

energia impulsu lasera	[J]	8	12	16	20	24
energia EA dla SiC	[pJ]	0.05	0.04	0.07	0.3	0.18
energia EA dla Si_3N_4	[pJ]	0.01	0.15	0.26	0.70	0.88

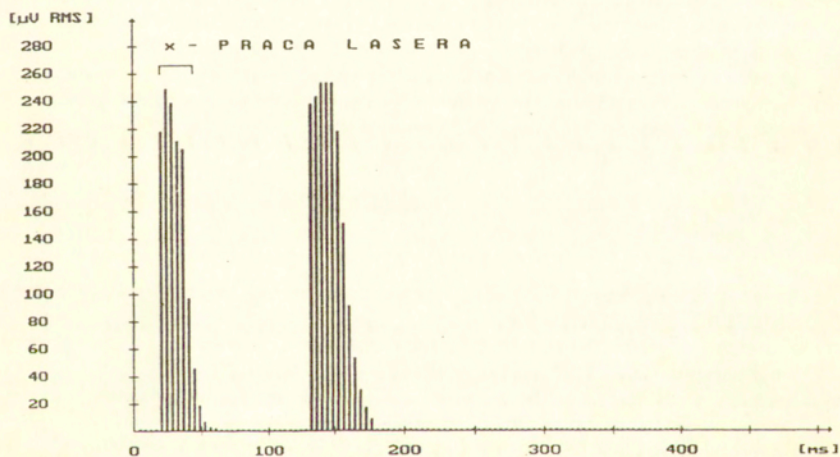
Dla ceramiki Al_2O_3 nie udało się uzyskać efektu przetopienia pomimo stosowania nasświetlania o energii rzędu tysiąca dżuli ze względu na znikomą absorpcję tego materialu



Rys. 5. Zdjęcie mikroskopowe struktury SiC wraz z rysą. Powiększenie 1000 X.



Rys. 6. Aktywność akustyczna próbki z SiC, moc lasera - 1000 W, czas naświetlania 25 ms.



Rys. 7. Aktywność akustyczna próbki z Si_3N_4 , moc lasera - 1000 W, czas naświetlania 25 ms.

Ponizej zostaną przedstawione wnioski dotyczące uzyskanych efektów akustycznych w odniesieniu do użytych energii promieniowania lasera.

WNIOSKI

- Pomiar emisji akustycznej w trakcie nasświetlania laserem próbek ceramicznych jest czułym miernikiem efektów materiałowych towarzyszących szokom cieplnym
- również szoki cieplne nie powodujące destrukcji struktury ceramiki (energii promieniowania rzędu 1J/ 10 ms) mogą być monitorowane z wykorzystaniem metody EA
- zależność energii sygnału EA od energii źródła szoku cieplnego nie jest liniowa i jest różna dla ceramik o różnej absorpcji użytego promieniowania
- rozpatrując trzy badane rodzaje materiałów ceramicznych, najwyższą absorpcję zarejestrowano w przypadku SiC, natomiast absorpcja Al₂O₃ była znikoma w porównaniu z dwoma pozostałymi
- rozwój procesów destrukcji struktury ceramiki, w tym wzrost mikrorys może być rejestrowany za pomocą metody EA
- próby destrukcji struktury ceramiki generują sygnał EA po wyłączeniu lasera; energia tych sygnałów ma poziom porównywalny z energią generowaną w trakcie nasświetlania z mocą lasera rzędu 50 - 100 W przez 25 ms.

LITERATURA

- [1].Ranachowski J.,Rejmund F.: Emisja akustyczna w procesie kruchego pęknięcia ceramiki. Prace IPPT, 27/1993, Warszawa.
- [2].Hasselmann D.P.H.: Thermal stress crack stability and propagation in severe thermal environments. *Material Science Res.*, Plenum Press, 1971, pp. 89-103.
- [3].Frąckiewicz H.,Ranachowski Z. et al.: Emisja akustyczna w procesie laserowego kształtowania metali. Prace IPPT, 24/1993, Warszawa.
- [4].Coppola J.A.,Bradt R.C.: Thermal shock damage in SiC. *J.Amer Ceram Soc.*, 56, 4, pp. 214-218 (1983)