

WSPÓŁCZYNNIK UWALNIANIA ENERGII JAKO PARAMETR OCENY ODPORNOŚCI STRUKTURY DWUFAZOWEJ STAL-PMMA NA PĘKANIE W ZŁOŻONYM STANIE OBCIĄŻENIA

Grzegorz MIECZKOWSKI*, Krzysztof MOLSKI*

*Katedra Budowy i Eksploatacji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

gmiecz@pb.edu.pl, kmolski@pb.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań odporności na pękanie struktury stal-PMMA ze szczeliną międzyfazową. Na drodze doświadczalnej wyznaczono krytyczne wartości siły zrywającej oraz zakresy zmian obciążenia w funkcji liczby cykli uruchamiające proces pękania struktury. Badania przeprowadzono dla szeregu próbek o różnych proporcjach między naprężeniami stycznymi i normalnymi, w płaszczyźnie połączenia dwóch materiałów.

Zbadano przydatność stosowania współczynnika uwalniania energii G jako parametru określającego wytrzymałość struktury. Wartości krytyczne parametru G_c wyznaczono sposobem doświadczalno - numerycznym polegającym na uwzględnieniu krytycznej wartości obciążenia, w analizie tego zagadnienia, wykonanej metodą elementów skończonych MES.

1. WSTĘP

Proces pękania kruchego i zmęczeniowego materiałów wielofazowych różni się pod wieloma względami od przebiegu pękania materiałów jednofazowych. Sąsiedztwo dwóch materiałów o różnych wartościach modułu Younga i współczynnika Poissona tworzących strukturę dwufazową powoduje, że pęknięcie propaguje zwykle wzdłuż granicy obu faz. Wiadomo również, że teoretyczne rozwiązania pól naprężeń w przypadku zagadnień szczelin w materiałach wielofazowych (Erdogan, 1963), różnią się jakościowo i ilościowo od rozkładów naprężeń dla szczelin w materiałach jednorodnych.

W materiałach jednorodnych do opisu warunków rozwoju pęknięcia kruchego i zmęczeniowego stosuje się współczynnik intensywności naprężenia K lub związany z nim parametr energetyczny G , zwany współczynnikiem uwalniania energii. W płaskich zagadnieniach wielkość energii uwalnianej można wyrazić przez dwa niezależne komponenty G_I oraz G_{II} , odpowiadające energii pochodzącej od rozciągania i ścinania materiału w płaszczyźnie szczeliny. W modelowaniu pękania materiałów wielofazowych bierze się zwykle pod uwagę całkowitą wartość współczynnika G , co wynika z braku możliwości rozdzielania uwalnianej energii na poszczególne składniki G_I oraz G_{II} . Ma to miejsce w sytuacji, gdy w rozwiązaniu teoretycznym opisującym pole naprężeń w okolicy wierzchołka pęknięcia, występuje wykładnik potęgowy o wartości zespolonej. Na rozkład naprężeń, w otoczeniu wierzchołka szczeliny, w znaczącym stopniu wpływają również człony trygonometryczne rozwiązania analitycznego, a uogólnione współczynniki intensywności naprężeń K_I^* i K_{II}^* muszą zawsze występować jednocześnie.

2. CELE PRACY

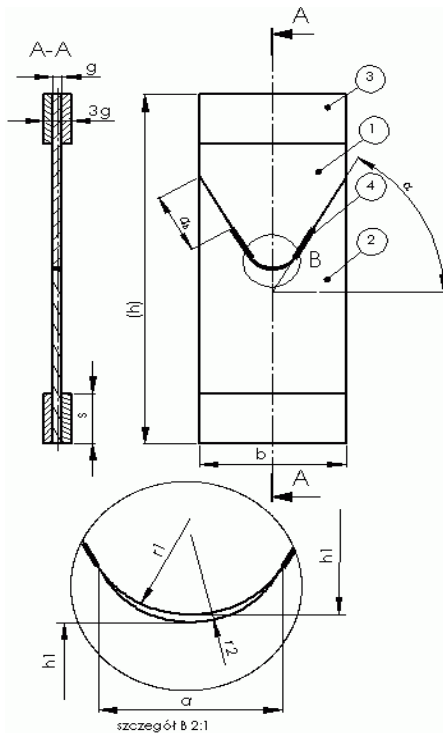
Na podstawie analizy rozwiązań teoretycznych otrzymanych dla szczelin międzyfazowych można stwierdzić, że taką samą wartość współczynnika uwalniania energii G można otrzymać przy różnej kombinacji obciążeń nominalnych – normalnych i stycznych – działających w płaszczyźnie szczeliny. Zgodnie z metodyką opisaną w wielu pracach (np. Murakami, 1987) zakłada się, że wzajemne relacje między składnikami naprężeń nominalnych nie mają wpływu na warunki pękania i zależą wyłącznie od wartości krytycznej G_c . Celem obecnej pracy było sprawdzenie na drodze doświadczalnej poprawności stosowania powyższego założenia w modelowaniu szczelin dwufazowych.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Do badań wykorzystano specjalne próbki wykonane (rysunek 1) z dwóch materiałów, stali i PMMA, o różnych stałych E i ν . W celu uniknięcia zginania badanych elementów, zaprojektowano próbki symetryczne, które były poddane procesowi rozciągania, gdzie złożone warunki obciążeniowe w strefie wierzchołkowej szczeliny można odnieść do położonej pod różnym kątem α płaszczyzny łączenia obu materiałów. Wartości charakterystyczne wszystkich rodzajów stosowanych próbek zamieszczono w tabeli 1.

Obie części każdej próbki łączono czołowo klejem Loctite 401 na pewnej długości wspólnej płaszczyzny połączenia. W czasie klejenia wykorzystano specjalnie skonstruowany przyrząd zapewniający właściwe położenie łączonych części zabezpieczający je przed wyboczeniem oraz umożliwiający kontrolę siły docisku. Na wolnych odcinkach a_b (rysunek 1) powstały międzyfazowe szczeliny boczne, natomiast w części środkowej, powstała łukowa szczelina centralna, zapewniająca łatwiejsze dopasowanie

łączonych elementów oraz zmniejszająca udział naprężeń nominalnych w procesie pęknięcia. Próbka oznaczona symbolem SP0 posiadała tylko prostą, poprzeczną szczelinę centralną o długości a .



Rys. 1. Próbka ze szczelinami międzyfazowymi użyta do badań: 1 – element stalowy, 2 – element z PMMA, 3 – nakładki, 4 – strefa połączenia obu elementów

Tab. 1. Wymiary próbek

Np	Symbol próbki	α [°]	r1 [mm]	r2 [mm]	h [mm]
1	SP60PL	-60	16	17.5	250
2	SP45PL	-45	18	21.5	250
3	SP30PL	-30	22	30	250
4	SP0	0	120	120	196
5	SP30S	30	30	22	251.2
6	SP45S	45	21.3	18	251.4
7	SP60S	60	17.4	16	251.4
a [mm]=30, b [mm]=96, g [mm]=6, s [mm]=36, $h1$ [mm]=125					

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON. Próbkę mocowano, w specjalnie zaprojektowanych, przegubowych uchwytach zapewniających osiowość obciążenia.

W celu wyznaczenia wytrzymałości statycznej badane próbki obciążano osiowo siłą rozciągającą i rejestrowano jej wartości, w funkcji czasu, aż do wystąpienia kruchego pęknięcia. Zrywanie próbek każdego typu powtarzano wielokrotnie – od 7 do 13 razy, dzięki czemu możliwe było statystyczne opracowanie wyników badań.

Przy wyznaczaniu trwałości do inicjacji pęknięcia, próbki poddano działaniu jednostronnych cykli rozciągających. Rejestrowano liczbę cykli, przy której następowała gwałtowna propagacja szczeliny oraz wartości zadawanego obciążenia. W ten sposób przebadano od 10 do 20 próbek każdego typu.

Długość bocznej szczeliny a_b była celowo zmieniana, w czasie sklejanie obu materiałów, w celu uzależnienia siły

krytycznej od długości pęknięcia i mierzona indywidualnie dla każdej próbki, przed i po jej zerwaniu. Przełomy wszystkich próbek były oceniane pod względem jakościowym i w dalszej analizie brano pod uwagę wyłącznie kohezjny charakter pęknięcia.

Następnie próbki modelowano metodą elementów skończonych MES w programie ANSYS i symulowano obciążenia osiowe siłami krytycznymi, uzyskanymi z badań eksperymentalnych. Korzystając z zależności (1) wyznaczano uogólnione współczynniki intensywności naprężeń K_I^* i K_{II}^* (Molski i Mieczkowski, 2004):

$$K_I^* = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r}^{1-\lambda_r} (\sigma_\phi(r,0) \cos(\Delta) + \tau_{r\phi}(r,0) \sin(\Delta))$$

$$K_{II}^* = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r}^{1-\lambda_r} (\tau_{r\phi}(r,0) \cos(\Delta) - \sigma_\phi(r,0) \sin(\Delta)) \quad (1)$$

gdzie: $\Delta = \delta \ln(r)$, $\delta = \frac{1}{2\pi} \text{Ln} \left(\frac{\kappa_1 \mu_2 + \mu_1}{\kappa_2 \mu_1 + \mu_2} \right)$,

a następnie obliczono współczynniki uwalniania energii G_c ze wzoru (2) (Molski 2000):

$$G = \frac{1}{16 \cosh(\pi\delta)^2} \left(\frac{1+\kappa_1}{\mu_1} + \frac{1+\kappa_2}{\mu_2} \right) (K_I^{*2} + K_{II}^{*2}) \quad (2)$$

4. WYNIKI

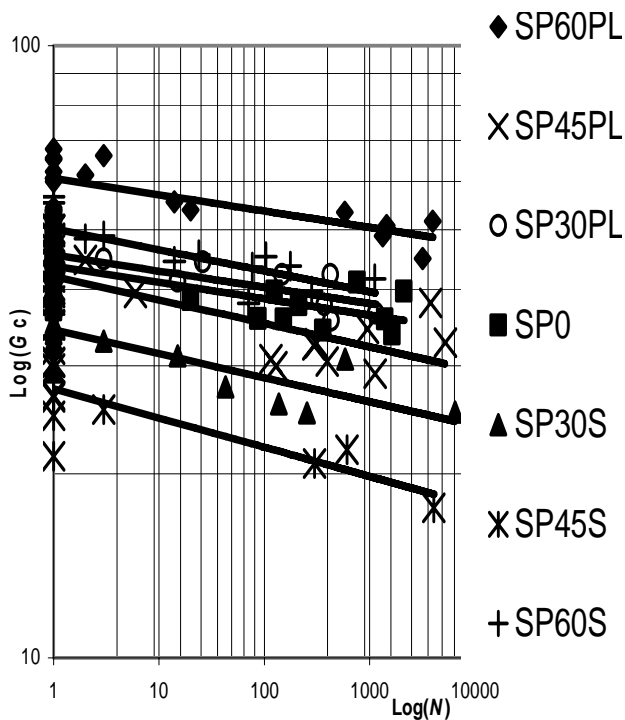
Współczynniki uwalniania energii G_c obliczono indywidualnie dla każdej próbki uwzględniając długości szczelin i obciążenie niszczące. W tabeli 2 podano średnie wartości parametru G_c , określającego statyczną wytrzymałość badanych elementów oraz wielkość odchylenia standardowego dla wszystkich rodzajów próbek.

Tab. 2. Krytyczne wartości współczynników uwalniania energii G_c w zależności od kąta α

Typ próbki	α [°]	G_c [J/m ²]	Liczba prób	Odchylenie standardowe [J/m ²]
SP60PL	-60	58,67	10	3,94
SP45PL	-45	42,58	13	5,49
SP30PL	-30	44,45	12	5,78
SP0	0	44,2	11	4,54
SP30S	30	34,93	9	5,11
SP45S	45	27,75	8	3,50
SP60S	60	48,8	7	7,23

Na rysunku 2 zamieszczone zostały wykresy trwałości do inicjacji pęknięcia różnych rodzajów próbek. W skali logarytmicznej, podano wartości współczynników G_c oraz odpowiadające im liczby cykli N , przy których następowało gwałtowne pęknięcie próbki, czyli nagły wzrost istniejącej wcześniej szczeliny. Na wykresie zamieszczono również dla porównania wyniki badań statycznych.

Otrzymane wyniki obliczeń parametru G_c określającego wytrzymałość doraźną struktur dwufazowych, poddano analizie statystycznej. Z testów Levene'a jednorodności wariancji oraz, w wyniku testowania hipotezy o równości średnich w wielu grupach (ANOVA) stwierdzono, że wartości zmiennej, dla każdego typu próbek, podlegają rozkładowi zbliżonemu do normalnego, a średnie wartości współczynników uwalniania energii G_c dla poszczególnych typów próbek różnią się w sposób statystycznie istotny.



Rys. 2. Trwałość do zainicjowania pęknięcia struktury dwufazowej ze szczeliną

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych, obliczeń numerycznych i analiz statystycznych można stwierdzić, że krytyczna wartość współczynnika uwalniania energii G_c towarzysząca rozwojowi pęknięć międzyfazowych nie jest wielkością stałą dla badanych materiałów. Wartości parametrów krytycznych G_c zależały od kąta położenia płaszczyzny łączenia, co oznacza, że pęknięcie następowało przy różnych proporcjach między naprężeniami stycznymi i normalnymi w płaszczyźnie pęknięcia wpływającymi na wielkość współczynnika uwalniania energii G_c .

Przeprowadzone badania zmęczeniowe potwierdziły, że zjawisko to ma podobny charakter również w analizowanym przypadku. Wszystkie otrzymane charakterystyki trwałościowe do inicjacji pęknięcia układają się w zasadzie wzdłuż linii równoległych i zgadzają się ze średnimi wartościami obciążenia quasi-stacynnego, otrzymanymi w próbach obciążeń doraźnych. Oznacza to, że stosowane kryterium stałego krytycznego współczynnika uwalniania energii całkowitej G_c , w modelowaniu wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej struktury stal-PMMA ze szczeliną międzyfazową, nie opisuje w sposób zadowalający krytycznych warunków pęknięcia, w złożonym stanie obciążenia.

LITERATURA

1. Brahtz J. H. A. (1933), Stress distribution in a reentrant corner, *Trans. ASME*, 55, 31-37.
2. Dundurs J. (1967), Effect of elastic constants on stress in a composite under plane deformation, *J. Comp. Mater.*, 1, 310.

3. Erdogan F. (1963), Stress Distribution in a Non-homogeneous Elastic Plane with Cracks, *Trans. ASME, Ser. E, J. Applied Mechanics*, 30, 232-236.
4. Mieczkowski G., Molski K. (2005), Stress field singularities for reinforcing fibre with a single lateral crack, *Solid Mechanics and Its Applications*, 135, 185-192.
5. Mieczkowski G., Molski K. L., Seweryn A. (2003), Numeryczne modelowanie pól naprężeń i przemieszczeń w okolicy wierzchołkowej ostrych wtrąceń materiałowych, *II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji*, 241-246.
6. Molski K. L. (2000), Zastosowanie jednostkowej funkcji wagowej w wymiarowaniu konstrukcji metodami mechaniki pęknięcia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
7. Molski K. L., Mieczkowski G. (2004a), Local displacement effects in the vicinity of interfacial crack tip, *Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity, Academician of NASU V.V. Panasyuk*, 325-331.
8. Molski K. L., Mieczkowski G. (2004b), Rozkład naprężeń i przemieszczeń w okolicy wierzchołkowej ostrego wtrącenia z jednostronnym wzdłużnym pęknięciem, *XII Francusko-Polskie Seminarium Mechaniki*, 85-92.
9. Molski K. L., Mieczkowski G. (2005), Osobliwości oscylacyjne pola naprężeń dla sztywnego wtrącenia z rozwarstwieniem, *Konferencja Naukowa MECHANIKA*, Gdańsk, 173-179.
10. Murakami Y. (ed.), (1987), *Stress Intensity Factors Handbook*, Pergamon Press.
11. Parton V. Z., Perlin P. I. (1984), *Mathematical Methods of the Theory of Elasticity*, Mir Publishers, Moscow.
12. Salganik R. L. (1963), The Brittle Fracture of Cemented Bodies, *Probl. Mat. Mech.*, 27.
13. Seweryn A. (2003), *Metody numeryczne w mechanice pęknięcia*, Biblioteka Mechaniki Stosowanej, IPPT PAN.
14. Seweryn A., Molski K. L. (1996), Elastic stress singularities and corresponding generalized stress intensity factors for angular corners under various boundary conditions, *Eng. Frac. Mech.*, 55, 529-556.
15. Sih G. C., Chen E. P. (1981), *Cracks in Composite Materials, Ch.3 (Mechanics of Fracture VI)* ed. G. C. Sih, Martinus Nijhoff Publishers, Hague.
16. Wolfram S. (2003), *The Mathematica Book*, 5th ed. Wolfram Media.

ENERGY RELEASE RATE G_c AS A FRACTURE PARAMETER OF A BI-MATERIAL STRUCTURE STEEL-PMMA WITH INTERFACIAL CRACK

Abstract: The present paper deals with experimental approach to critical quasi-static and fatigue fracture conditions for a bi-material structure steel-PMMA with interfacial crack under complex stress state along the bond. Seven different types of samples were used of various crack lengths and different inclination angles of the bond with respect to the loading direction.

Critical values G_c of the energy release rate were determined for all types of specimens using numerical FEM approach and considering maximal forces obtained experimentally.

Analysis performed has shown that G_c values were not constant for all types of specimens. Since G_c depends on the inclination angle of the bond some other fracture criteria should be developed to increase accuracy of theoretical models describing fracture processes of interfacial cracks.

Praca jest częścią projektu N N501 0110 33 finansowanego przez MNiSzW oraz realizowanego w Politechnice Białostockiej.