

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Prognozowanie pęknięcia elementów wykonanych z PMMA osłabionych korbami, w warunkach dwuosioowego stanu obciążenia

Elżbieta Bura<sup>1</sup>, Andrzej Seweryn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

<sup>2</sup>Instytut Budowy Okrętów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska

email: [e.bura@pb.edu.pl](mailto:e.bura@pb.edu.pl), [andrzej.seweryn@pg.edu.pl](mailto:andrzej.seweryn@pg.edu.pl)

**STRESZCZENIE:** Celem podjętych badań było wyznaczenie krytycznych wartości obciążenia podczas pęknięcia elementów z korbami, wykonanych z PMMA. Wykorzystano próbki o dwóch grubościach oraz zastosowano karby o różnym promieniu zaokrąglenia dna, w celu ustalenia wpływu tych parametrów na przebieg procesu pęknięcia. Przedstawiono wyniki testów pęknięcia w warunkach rozciągania ze skręcaniem. Wyznaczono miejsca inicjacji pęknięć. Na podstawie danych eksperymentalnych przeprowadzono obliczenia numeryczne z wykorzystaniem MES. Wyznaczono pola naprężeń oraz odkształceń plastycznych w warunkach krytycznego obciążenia. Sformułowano naprężeniowo-odkształceniowe kryterium pęknięcia, które może być z powodzeniem stosowane do przewidywania pęknięcia płaskich próbek wykonanych z PMMA, niezależnie od promienia karbu, rodzaju obciążenia czy grubości elementu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** PMMA, rozciąganie ze skręcaniem, karby, kryterium pęknięcia, metoda elementów skończonych

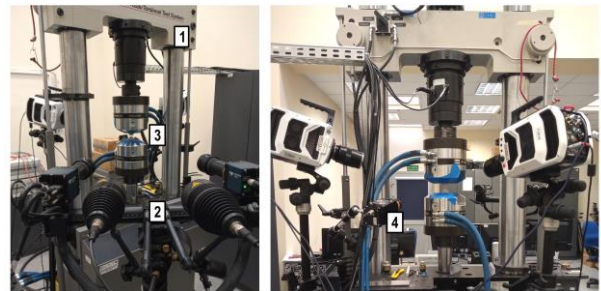
#### 1. Wprowadzenie

Najczęściej badania pęknięcia elementów z korbami wykonanych z polimetakrylanu metylu (PMMA) dotyczą prostych stanów obciążenia i czystych typów odkształcenia szczeliny lub karbu. Pęknięcie tego typu elementów podczas czystego rozrywania opisano w wielu pracach dotyczących rozciągania [1-3] a także ściskania [4,5]. Podobnie pęknięcie elementów z PMMA z korbami w warunkach ścinania poprzecznego (skręcanie) było przedmiotem kilku publikacji naukowych [6]. W rzeczywistych warunkach eksploatacji, elementy te najczęściej doświadczają pęknięcia w mieszanych typach odkształcenia, co determinuje aktualny przedmiot badań w pracach dotyczących mechaniki pęknięcia.

W niniejszej pracy podjęto próbę szczegółowego opisu zjawiska pęknięcia w PMMA w warunkach, w których ten materiał charakteryzuje się znaczącym wpływem odkształceń plastycznych.

#### 2. Stanowisko badawcze

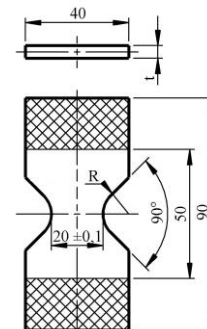
Testy rozciągania ze skręcaniem realizowano z wykorzystaniem dynamicznej dwuosiowej maszyny wytrzymałościowej MTS 809.10. Stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 1. Pomiaru kąta skręcenia dokonano dzięki systemowi wizyjnemu ARAMIS 3D 4M. Eksperyment prowadzono w warunkach kontrolowanego przemieszczenia. Obciążenia zadawano proporcjonalnie, tj. jednocześnie obciążano próbkę siłą rozciągającą oraz momentem skręcającym tak, aby w danej chwili próbka doznawała obciążenia równego tej samej części krytycznej siły rozciągającej uzyskanej w badaniach czystego rozciągania oraz tej samej części krytycznego momentu skręcającego uzyskanego w badaniach skręcania [6].



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – MTS 809.10, 2 – ARAMIS 3D 4 M, 3 – próbka, 4 – LED [8]

#### 3. Materiał i próbki

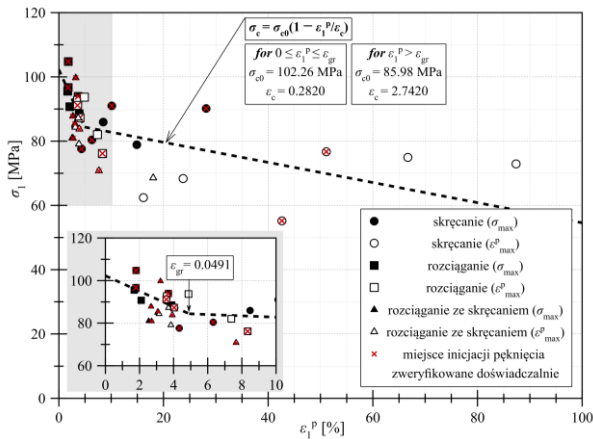
Wykorzystano płaskie próbki wykonane z PMMA. Elementy osłabiono obustronnie korbami krawędziowymi typu V o kącie rozwarcia 90° oraz różnym promieniem zaokrąglenia dna  $R$  równym: 0,5; 2 oraz 10 mm (rys. 2). Elementy wykonano z wylewanych arkuszy materiału o dwóch grubościach nominalnych 5 oraz 15 mm.



Rys. 2. Próbkę z korbami

#### 4. Wyniki badań

Dzięki bezkontaktowemu systemowi wizyjnemu ARAMIS 3D 4M zarejestrowano pomiar wydłużenia i kąta skręcenia. Podczas części eksperymentalnej wszystkie procesy deformacji były obserwowane za pomocą kamer PHANTOM. Uzyskane zapisy pozwoliły na precyzyjne wskazanie momentu inicjacji pęknięcia (krytycznej wartości siły rozciągającej i momentu skręcającego). Na podstawie obserwacji mikroskopowych wyznaczono miejsca inicjacji pęknięć. Wyniki uzyskane dla obciążenia dwuosiowego porównano z wynikami uzyskanymi dla jednoosiowego rozciągania i skręcania. Na podstawie danych eksperymentalnych przeprowadzono obliczenia numeryczne za pomocą MES. Uzyskano rozkład naprężeń i odkształceń plastycznych w warunkach obciążenia krytycznego. Wskazano punkty występowania maksimum naprężeń i odkształceń plastycznych, które uznano za potencjalne miejsca inicjacji pęknięć. Na podstawie wartości naprężeń i odkształceń plastycznych wyznaczonych w punktach krytycznych sformułowano naprężeniowo-odkształceniowe kryterium pęknięcia (rys. 2), które następnie pozytywnie zweryfikowano (rys. 3).



Rys. 2. Kryterium pęknięcia oraz krytyczne wartości naprężeń i odkształceń plastycznych w miejscu inicjacji pęknięcia [8]

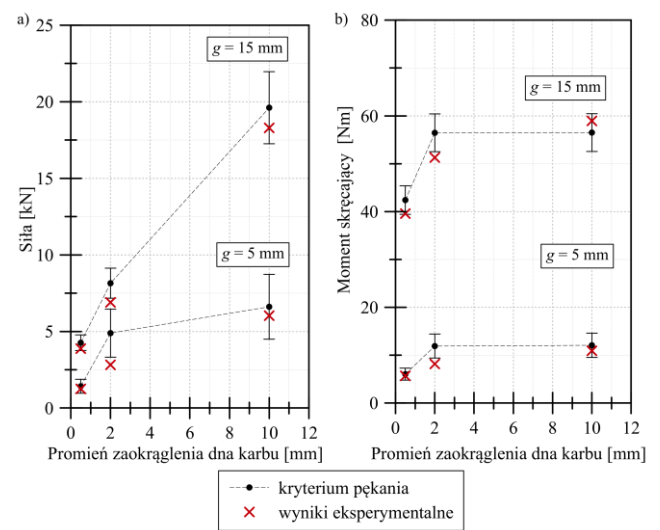
W kryterium uwzględniono wcześniej uzyskane wyniki dla jednoosiowych prób rozciągania i skręcania [6]. Dwuliniowa postać kryterium pęknięcia może być z powodzeniem stosowana do przewidywania pęknięcia płaskich próbek PMMA, niezależnie od promienia karbu, rodzaju obciążenia czy grubości elementu.

#### 5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych pęknięcia i obliczeń numerycznych płaskich próbek osłabionych korbami, wykonanych z PMMA, poddanych dwuosiowemu obciążeniu (rozciąganie ze skręcaniem). Cyfrowa korelacja obrazu została wykorzystana do pomiaru przemieszczeń na powierzchni próbek, a w szczególności kąta skręcenia bazy pomiarowej. Ważną częścią badania było określenie wartości obciążenia krytycznego, a także lokalizacja miejsca inicjacji pęknięcia. Ponieważ miejsca te znajdowały się zarówno w dnie karbu, jak i w pewnej odległości od niego. Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych zawierają sprężysto-plastyczny model materiału, w którym pierwsze odkształcenia plastyczne pojawiają się już od

granicy sprężystości. Jest to ważne w przypadku małych promieni zaokrąglenia dna karbu.

Do przewidywania pęknięcia zastosowano kryterium naprężeniowo-odkształceniowe. Zauważono bowiem, że za inicjację pęknięcia odpowiedzialne są naprężenia normalne, których wartość krytyczna zależy od wartości odkształcenia plastycznego. Kryterium opisują dwie linie proste, w zależności od wartości największego głównego odkształcenia plastycznego. Szczególnie zadowalająca jest zgodność przewidywań z wynikami testów eksperymentalnych przeprowadzonych dla rozciągania i rozciągania-skręcania, gdzie nie występują duże odkształcenia plastyczne. Mniejsza dokładność dotyczy próbek skręcanych (większe odkształcenia plastyczne), ale wtedy również powtarzalność wyników eksperymentalnych jest mniejsza i występują trudności w zlokalizowaniu miejsca inicjacji pęknięcia.



Rys. 3. Eksperymentalne i numeryczne wartości krytycznego obciążenia: a) siły rozciągającej oraz b) momentu skręcającego [8]

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr WZ/WM-IIM/4/2023.

#### Literatura

- [1] E. Bura, A. Seweryn, *Mode I fracture in PMMA specimens with notches – Experimental and numerical studies, Theor Appl Fract Mech*, vol. 97, pp. 140–155, 2018.
- [2] A. Seweryn, *Brittle fracture criterion for structures with sharp notches, Eng Fract Mech*, vol. 47, no. 5, pp. 673–681, 1994.
- [3] A. R. Torabi et al., *Fracture testing and estimation of critical loads in a PMMA-based dental material with nonlinear behavior in the presence of notches, Theor Appl Fract Mech*, vol. 118, p. 103282, 2022.
- [4] E. Bura et al., *Fracture in PMMA notched specimens under compression – Experimental study, Polym Test*, vol. 77, 2019.
- [5] E. Bura, A. Seweryn, *Fracture initiation in notched specimens subjected to compression: Strain rate effect, Mat*, vol. 13, no. 11, 2020.
- [6] E. Bura, A. Seweryn, *The fracture behaviour of notched PMMA specimens under simple loading conditions – Tension and torsion experimental tests, Eng Fail Anal*, vol. 148, p. 107199, 2023.
- [7] E. Bura, A. Seweryn, *The elasto-plastic numerical study of crack initiation in notched PMMA specimens under uniaxial loading conditions – Tension and torsion, Theor Appl Fract Mech*, vol. 128, p. 104171, 2023.
- [8] E. Bura et al., *The experimental and numerical investigation of fracture behaviour in PMMA notched specimens under biaxial loading conditions – Tension with torsion, Eng Fract Mech*, vol. 303, p. 110132, 2024.