

## INICJACJA ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH W STALI Z WYRAŹNĄ GRANICĄ PLASTYCZNOŚCI W WARUNKACH GRADIENTU NAPRĘŻEŃ

Stefan BUĆKO\*, Henryk JODŁOWSKI\*

\*Katedra Mechaniki Doświadczalnej i Biomechaniki, Instytut Mechaniki Stosowanej,  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 30 -864 Kraków

[s\\_bucko@mech.pk.edu.pl](mailto:s_bucko@mech.pk.edu.pl), [abies@mech.pk.edu.pl](mailto:abies@mech.pk.edu.pl)

**Streszczenie:** Praca obejmuje badania zmierzające do wyznaczenia naprężeń granicznych odpowiadających początkowi odkształceń plastycznych w rozciąganych tarczach z otworami o różnych średnicach. Dodatkowo wyznaczano zarys i sposób propagacji strefy plastycznej przy otworze. W badaniach stosowano autorską metodę rozpoznawania odkształceń plastycznych wykorzystującą zjawisko interferencji optycznej światła monochromatycznego. Metodę zaprezentowano na przykładzie statycznej próby rozciągania próbki ze stali NWC. Przedstawiono dokumentację fotograficzną rozwoju strefy odkształceń plastycznych dla przykładowego otworu oraz zestawienie wartości naprężeń granicznych dla różnych stosunków średnicy otworu do szerokości rozciąganej tarczy.

### 1. WPROWADZENIE

W analizie zagadnień sprężysto-plastycznych powszechnie przyjmuje się, obowiązywanie warunku plastyczności tj. osiągnięcie przez naprężenie zredukowane wartości  $R_e$  wyznaczonej w statycznej próbie rozciągania, skutkuje powstaniem strefy plastycznej. Problemy interpretacyjne dotyczące początku odkształceń plastycznych występują w stanach o dużych gradientach naprężeń. Powstawanie obszaru odkształceń plastycznych wewnątrz strefy sprężystej jest jedną z cech charakterystycznych niejednorodnych stanów naprężeń np. propagacja szczelin, uplastycznienie wokół otworów itp. W literaturze można spotkać różne koncepcje zmierzające do korekty obliczeń zmęczeniowych dla korbów np. Neuber'a bądź pojęcie „naprężenie płynięcia” w mechanice pękania dla korekty obliczeń odporności na pęknięcie. Świadczy to o niedoskonałości założeń stosowanych analiz teoretycznych. W materiałach wykazujących wyraźną granicę plastyczności najmniejsze odkształcenia plastyczne mogą być nawet o rząd wielkości większe od odkształceń sprężystych odpowiadających granicy sprężystości (plastyczności).

Dotychczasowa praktyka badawcza stanów sprężysto-plastycznych w warunkach gradientu naprężeń np. w otoczeniu otworów w tarczach, polegała na pomiarze przemieszczeń, obliczeniu odkształceń i wykorzystaniu warunku plastyczności bądź też na wykorzystaniu warstwy optycznie czynnej i warunku plastyczności. W rezultacie kształt strefy plastycznej zależał od wyników pomiarów ale silniej od przyjętego warunku plastyczności, co już nie było obiektywnym wynikiem eksperymentu. Nie sprawdzano przy tym czy odkształcenia rzeczywiście są plastyczne.

W prezentowanej pracy przedstawiono wybrane fragmenty doświadczalnych badań stref plastycznych wokół otworów kołowych w rozciąganych cienkich tarczach ze stali 15HM (wykazującej wyraźną granicę plastyczności).

W omawianych badaniach stosowano nową autorską metodę rozróżniania stref odkształceń sprężystych i plastycznych (Bućko i Jodłowski, 2007; Jodłowski, 2007). Dodatkowo przeprowadzono również weryfikację poprawności oceny obciążenia odpowiadającego pierwszym odkształceniom plastycznym metodą odciążania.

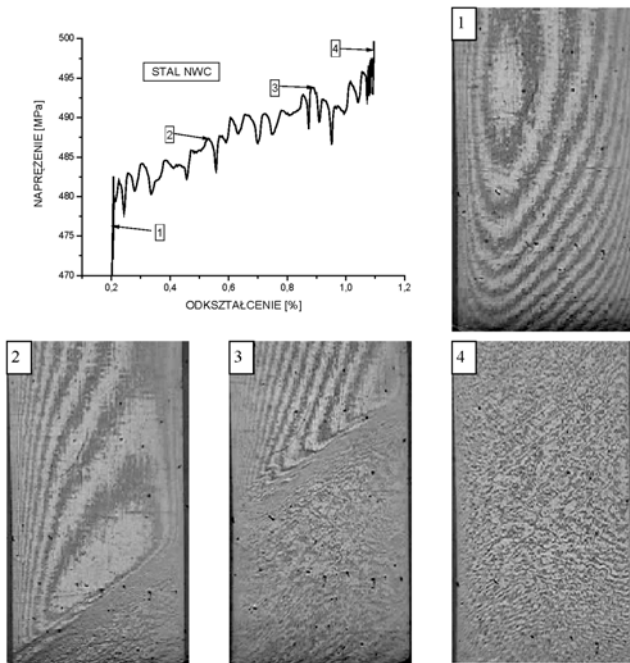
### 2. OPIS METODY BADAWCZEJ

Wobec braku w mechanice doświadczalnej skutecznej metody rozpoznawania odkształceń plastycznych w procesie czynnym autorzy podjęli badania zmierzające do opracowania takiej metody i wyjaśnienia przebiegu początkowej fazy odkształceń plastycznych.

Badania te, opisane w pracach: Bućko i Jodłowski, (2005, 2007) oraz Jodłowski (2007) doprowadziły do opracowania nowej metody doświadczalnej, której istotą jest wykorzystanie zjawiska interferencji optycznej do kwalifikacji plastycznego charakteru odkształceń w materiałach z wyraźną granicą plastyczności w czynnym procesie obciążania.

Stwierdzono mianowicie, że pojawienie się odkształceń (poślizgów) plastycznych w skali odpowiadającej wyraźnej granicy plastyczności w stalach wykazujących niestateczność materiałową powoduje zanik zjawiska interferencji optycznej (zanik prążków interferencyjnych) występującego wcześniej na wypolerowanej powierzchni próbki. Weryfikację metody rozpoznawania odkształceń plastycznych przeprowadzono w statycznych próbach rozciągania, gdzie występuje jednorodne pole naprężeń i każdemu punktowi wykresu rozciągania można jednoznacznie przyporządkować odpowiedni stan fizyczny materiału badanej próbki.

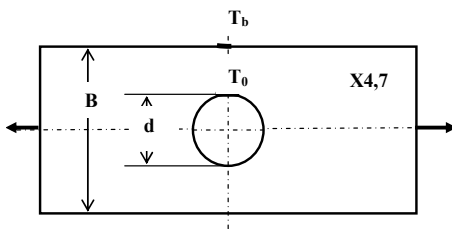
Jako przykład zastosowania omawianej metody, pokazano na rysunku 1 odcinek dokładnego wykresu rozciągania stali NWC z zaznaczonymi współrzędnymi  $\sigma - \epsilon$  i odpowiadającymi im obrazami prążków interferencyjnych.



**Rys 1.** Fragment wykresu rozciągania stali NWC we współrzędnych  $\sigma - \varepsilon$  w strefie plastycznego płynięcia. Numery zdjęć odpowiadają numerom punktów na odcinku wykresu rozciągania: 1 – obraz prążków w zakresie sprężystym; 2 – w dolnym prawym rogu widoczna strefa plastyczna bez prążków interferencyjnych; 3 – widoczna znacznie powiększona strefa plastyczna; 4 – uplastyczniony cały widoczny fragment próbki

### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE STREFY PLASTYCZNEJ PRZY OTWORZE

Badania wykonywano na tarczach ze stali 15HM (schemat na rysunku 2), dla której  $R_e=368$  MPa oraz  $R_m=490$  MPa. Stosunek średnic otworów w tarczy do jej szerokości  $d/B$  zmieniał się w zakresie od 0.02 do 0.5.

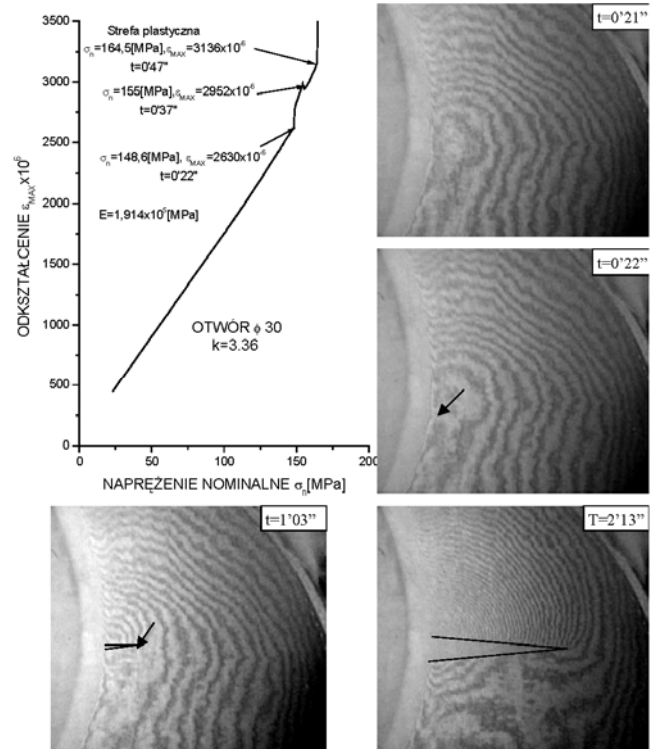


**Rys. 2.** Schemat badanej tarczy z tensometrami  $T_0$  i  $T_b$

Poniżej przedstawiono wyniki badań dla  $d/B=0,3$ . Na powierzchniach bocznych otworów, których wielkość to umożliwia, w miejscu występowania maksymalnych naprężeń wklejano tensometry elektrooporowe  $T_0$ , natomiast na powierzchni bocznej tarczy naklejano tensometry elektrooporowe  $T_b$  (rysunek 2). Tensometry służyły kontroli zależności między naprężeniem nominalnym, a maksymalnym odkształceniem obwodowym poboczniczy otworu. Do określenia początków oraz kształtu powstających stref plastycznych zastosowano tutaj metodę opisaną w punkcie 2. Na rysunku 3 pokazano zależność odkształcenia na powierzchni bocznej otworu ( $d/B=0,3$ ) w przekroju minimal-

nym tarczy od naprężenia nominalnego, oraz obrazy prążków jej przynależne. Rejestracja odkształceń, siły obciążającej oraz filmu Video były zsynchronizowane, co pozwala przypisać punktom wykresu odkształceń odpowiednie obrazy. Na wykresie odkształceń podano wartość współczynnika spiętrzenia naprężeń wg. Howlanda (1029-30) jako iloraz  $\sigma_{max}$  i  $\sigma_{nom}$  w przekroju poza otworem. W chwili pojawienia się odkształceń plastycznych naprężenia obliczone z pomiaru  $\sigma_{mo}=E \times \varepsilon=503$  MPa natomiast naprężenie obliczone z wzoru Howlanda  $\sigma_{Ho}=k \times \sigma_{nom}=492$  MPa. Obie wartości naprężeń różnią się nieznacznie i przekraczają granicę plastyczności materiału o  $\sim 40\%$ .

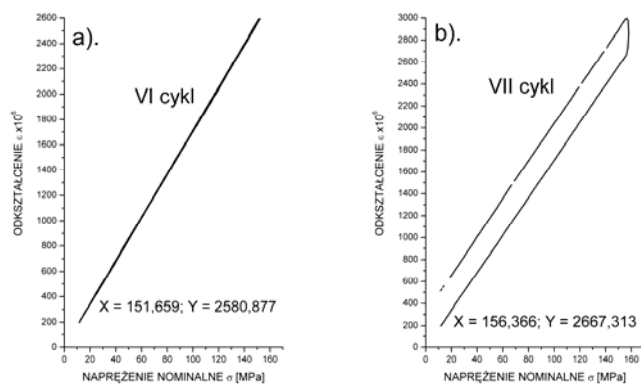
Na rysunku 3 pokazano 4 fotografie (wybrane z filmu) układu prążków. Pierwszy sygnał – zmiana układu prążków oraz nieliniowość wzrostu odkształceń wystąpiły w czasie  $t=0'22''$ . Następny wyraźniejszy sygnał poślizgu wystąpił dla  $t=0'47''$  obok pierwszego i zainicjował powstanie strefy plastycznej wyraźnie widocznej na fotografii dla  $t=2'13''$ . Uzyskane wyniki badań nad zdefiniowaniem chwili rozpoczęcia się odkształceń plastycznych, ich propagacji oraz kształtu strefy plastycznej nie są podobne do opisywanych w literaturze z wyjątkiem koncepcji Dugdale'a, który podawał podobny kształt strefy plastycznej. Charakter prążków interferencyjnych ( $t=2'13''$ ) wskazuje, że obszary po obu stronach strefy plastycznej przemieszczają się w przeciwnych kierunkach.



**Rys 3.** Stal 15HM. Tarcza z otworem  $d/B = 0,3$ . Korelacja wskazań tensometru elektrooporowego z obrazami prążków interferencyjnych (opis w tekście)

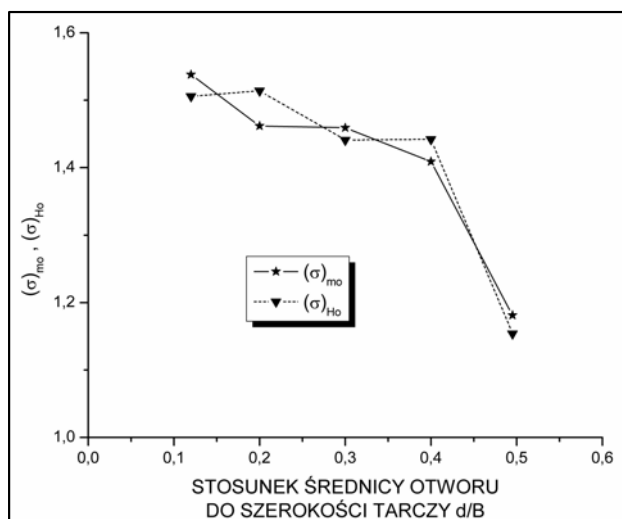
W strefie maksymalnego wyężenia naprężenia główne  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  przyjmują wartości dodatnie, zatem  $\tau_{max}=0,5 \times \sigma_1$  i działa w płaszczyźnie nachylonej pod kątem  $\sim 45^\circ$  do powierzchni środkowej tarczy co uzasadnia obserwowany kierunek poślizgu plastycznego. W omawianych badaniach przeprowadzono dodatkową kontrolę sprężystości odkształceń

metodą odciażania – najbardziej wiarygodną. Pokazane na rys. 4a wykresy odkształceń na brzegu otworu w procesach obciążania i odciażania odpowiadające naprężeniom nominalnym  $\sigma_n = 151,66 \text{ MPa}$  ( $\sigma_{\max} = 509,57 \text{ MPa}$ ) są liniowe i pokrywają się, co dowodzi sprężystości odkształceń.



Rys. 4. Weryfikacja sprężystości odkształceń

W następnym etapie, dla naprężeń  $\sigma_n = 156,37 \text{ MPa}$  wystąpiły już niewielkie odkształcenia plastyczne co pokazuje rysunek 4b. Wyniki metody odciażania, potwierdzają zatem wyniki uzyskane wcześniej metodą interferencji optycznej na tarczy wykonanej z tego samego arkusza blachy. Poniżej na rysunku 5 przedstawiono wykres obrazujący wartości bezwymiarowych naprężeń odpowiadających początkowi odkształceń plastycznych obliczonych wg Hollanda  $(\sigma)_{Ho} = \sigma_{Ho}/R_e$  oraz naprężeń wyznaczonych metodą interferencji optycznej  $(\sigma)_{mo} = \sigma_{mo}/R_e$ .



Rys. 5. Zależność bezwymiarowych naprężeń  $(\sigma)_{Mo} = \sigma_{mo}/R_e$  oraz  $(\sigma)_{Ho} = \sigma_{Ho}/R_e$  przy pierwszych poślizgach plastycznych od parametrów badanych tarcz

Jak widać dla dość dużego przedziału wartości  $d/B$  od 0,13 do 0,4 naprężenia graniczne przekraczają  $R_e$  o około 40%, natomiast dla  $d/B = 0,5$  przekroczenie to wynosi  $\sim 15\%$  co odpowiada wartości  $R_{eg}$ .

#### 4. WYNIKI BADAŃ I WNIOSKI

- Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność metody interferencji optycznej w badaniach stref plastycznych przy dużych gradientach naprężeń w stalach z wyraźną granicą plastyczności.
- Obserwowany kierunek poślizgów plastycznych pokrywa się z płaszczyzną działania  $\tau_{\max}$ .
- Przekroczenie przez naprężenie graniczne wartości granicy plastyczności wskazuje na występowanie pewnej bariery energetycznej uruchomienia poślizgu plastycznego, której wartość zależna jest zapewne od wielu parametrów w tym  $B$ ,  $d$ ,  $R_e$  i innych.

#### LITERATURA

1. Bućko S., Jodłowski H. (2005), Próba zdefiniowania granicy sprężystości w warunkach dużego gradientu naprężeń, *X Konferencja Mechaniki Pękania, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, Nr 304 *Mechanika*, z. 82.
2. Bućko S., Jodłowski H. (2007), Schematy poślizgów plastycznych w strefach koncentracji naprężeń, *Materiały IV Międzynarodowego Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji*, Augustów.
3. Howland R.C.J. (1929-30), *On the Stresses in Neighborhood of a Circular Hole in a Strip Under Tension*, *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, A, Vol. 229.
4. Jodłowski H. (2007), Doświadczalne wyznaczanie stref plastycznych w stalach z wyraźną granicą plastyczności, *Badania Eksperymentalne w Mechanice Ciała Stałego, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika*, z. 217.

#### INITIATION OF PLASTIC STRAINS IN STEEL WITH PHYSICAL YIELD POINT IN CONDITIONS OF STRESS GRADIENT

**Abstract:** The work contains tests approaching to determine the proof stress corresponding to the beginning of plastic deformations in elongated shields with holes of different diameters. Additionally, the profile and way of flow zone propagation near the hole was determined. In the tests, the authorship method of plastic strain identification based on monochromatic light optical interference effect was used. The method was presented on the example of static tensile test of the specimen made of NWC steel. The photographic documentation of the growth of plastic deformation zone for example hole and comparison of the proof stress values for different hole diameter-width of elongated shield ratios were presented.