

STEFAN BUĆKO, HENRYK JODŁOWSKI*

INICJACJA ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH W STALACH Z NIESTATECZNOŚCIĄ MATERIAŁOWĄ W WARUNKACH ROZCIĄGANIA I CZYSTEGO ZGINANIA

THE INITIATION OF PLASTIC DEFORMATION IN STEELS THAT EXHIBIT MATERIAL INSTABILITY UNDER AXIAL TENSION AND PURE BENDING

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych nad inicjacją odkształceń plastycznych w stali z wyraźną granicą plastyczności w warunkach rozciągania oraz czystego zginania. W badaniach stosowano autorską metodę wykorzystującą interferencję optyczną do identyfikacji odkształceń plastycznych w takich stalach. Eksperymenty obejmowały statyczne próby rozciągania próbek ze stali 45 i St6 oraz badanie czystego zginania próbek ze stali 45. Uzyskano obrazy stref plastycznych i przebieg ich propagacji dla obu prób. Proces inicjacji i rozwoju stref plastycznych udokumentowano na filmach CCD. Wyznaczono również obciążenia odpowiadające pierwszym odkształceniom plastycznym w próbce zginanej.

Słowa kluczowe: wyraźna granica plastyczności, interferencja optyczna, strefa plastyczna

Abstract

The results of experiments on plastic deformations initiation in steel with physical yield point under axial tension and pure bending are presented in the paper. The method based on using optical interference effect to identify plastic deformations in steels that exhibit material instability was applied in the tests. The experiment consisted of steel St6 and steel 45 specimens subjected to the tensile tests and steel 45 specimens subjected to the constant moment bending tests. The images of plastic zones distribution and their propagation were obtained in both experiments. The plastic zones initiation and their evolution processes were observed and documented on CCD films. Also the load values corresponding to first plastic deformations in the bent beam specimen were determined.

Keywords: physical yield point, optical interference, plastic zone

* Dr hab. inż. Stefan Bućko, prof. PK; dr inż. Henryk Jodłowski, Instytut Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Wieloletnie prace badawcze nad zachowaniem się stali z wyraźną granicą plastyczności nie dały dotychczas jasnej odpowiedzi na pytanie o początek odkształceń plastycznych w warunkach występowania gradientu naprężeń. W literaturze przedstawiane są kształty stref plastycznych wokół otworów, szczelin i w belkach zginanych nie poparte jednak pełnym rzeczywistym eksperymentem. Powszechnym obyczajem w uważanej za doświadczalną – analizie odkształceń plastycznych w niejednorodnych stanach naprężeń jest wykonywanie pomiarów przemieszczeń (lub odkształceń), następnie wyznaczanie odkształceń i wykorzystanie prawa Hooke'a dla określenia naprężeń, a później wyznaczenie stref plastycznych z warunku plastyczności. Taki tok postępowania występuje np. w pracach [1, 2, 5] i wielu innych dotyczących stref plastycznych przy otworach w tarczach poddanych rozciąganiu lub zginaniu. W programach wspomnianych wyżej badań z zasady pomijano doświadczalną weryfikację sprężystości odkształceń bezpośrednio po spełnieniu warunku plastyczności. Autorzy niniejszego artykułu wykonali również badania inicjacji stref plastycznych w strefie spiętrzenia naprężeń wokół otworu w rozciąganej tarczy [7, 10] bez wykorzystywania warunku plastyczności. We wspomnianej pracy zastosowano, podobnie jak w obecnej, autorską metodę rozpoznawania makroodkształceń plastycznych opartą na wykorzystaniu zjawiska interferencji optycznej [7–9]. Uzyskane wówczas wyniki zostały pozytywnie zweryfikowane metodą odciążania.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań procesu powstawania stref plastycznych w elementach wykonanych ze stali z wyraźną granicą plastyczności (stal 45 i stal St6) przy zastosowaniu opracowanej przez autorów, metody identyfikacji makroodkształceń plastycznych opartej na wykorzystaniu interferencji optycznej [7–9]. W pracy przedstawiono wyniki badań inicjacji stref plastycznych w próbkach ze stali 45 oraz St6 w statycznej próbie rozciągania oraz powstawanie i propagację odkształceń plastycznych w przypadku czystego zginania próbki ze stali 45. Wstępne wyniki tego ostatniego eksperymentu przedstawiono w referacie na V Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji 2009. Dla wymienionych eksperymentów pokazano wykresy zmierzonych odkształceń oraz obrazy stref plastycznych w początkowej fazie ich powstawania. Przebiegi wspomnianych wyżej procesów zostały zarejestrowane kamerą CCD w synchronizacji czasowej z pomiarami odkształceń, a zaprezentowane fotografie zostały wyodrębnione z tych filmów.

2. Powstawanie i propagacja strefy plastycznej w statycznej próbie rozciągania

2.1. Prezentacja metody badawczej

Metoda rozpoznawania makroodkształceń plastycznych w czynnym procesie obciążania wykorzystująca znane zjawisko interferencji optycznej została szczegółowo omówiona i uzasadniona w wcześniej wymienionych pracach [7–9]. Poniżej zaprezentowano skrócony opis metody badawczej natomiast w następnym punkcie przykłady badań weryfikujących poprawność i skuteczność metody w statycznej próbie rozciągania. Idea omawianej metody badawczej jest następująca:

„Prążki interferencyjne będące oznaką zdolności wypolerowanej powierzchni próbki do odbijania światła mogą występować tylko na powierzchni tych ziaren, w których nie wystą-

pił jeszcze poślizg plastyczny, czyli znajdujących się w stanie sprężystym. O wystąpieniu odkształceń plastycznych w czynnym procesie obciążenia świadczy zatem zanik występujących wcześniej prążków interferencyjnych”.

Metoda badawcza oparta na sformułowanej powyżej zasadzie może wykrywać prawdopodobnie jedynie makroodkształcenia plastyczne w skali występującej po osiągnięciu wyraźnej granicy plastyczności, przy czym możliwa jest obserwacja ich powstawania w czynnym procesie obciążania. Metoda nie wymaga zatem przerywania eksperymentu celem wykonania badań mikroskopowych bądź procesu odciążania dla weryfikacji charakteru odkształceń. Zaproponowana metoda nie jest wrażliwa na ewentualne przemieszczenia obserwowanej powierzchni próbki ponieważ liczba prążków interferencyjnych (świadcząca o odległości między płytka interferencyjną i próbka) nie jest istotna, istotne jest występowanie bądź zanik zjawiska interferencji optycznej. Istotną zaletą metody interferencji optycznej jest także możliwość wizualizacji procesu powstawania i propagacji odkształceń plastycznych.

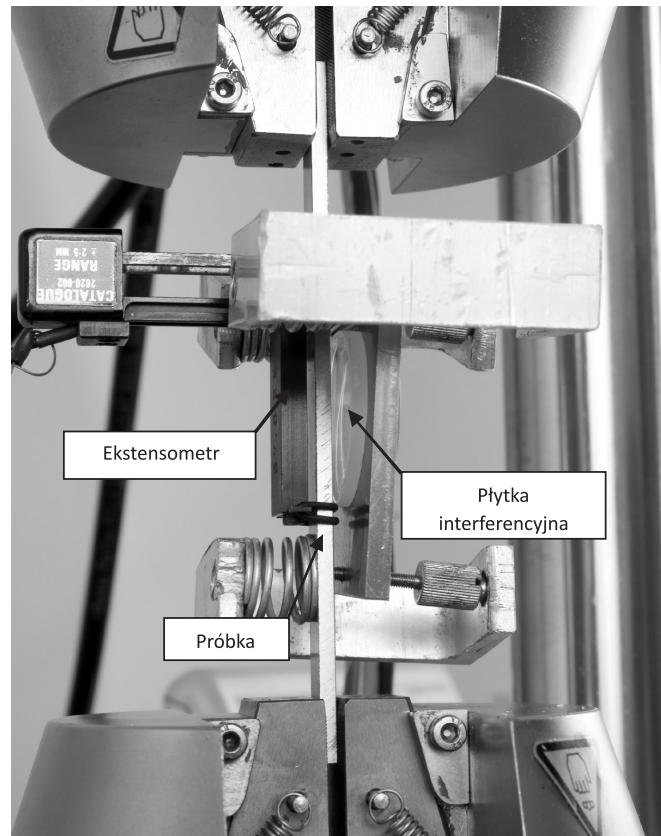
2.2. Próbki i metoda badań

Wykorzystanie zjawiska interferencji optycznej narzuca konieczność stosowania w badaniach próbek z powierzchniami płaskimi. W omawianych niżej eksperymentach stosowano próbki o przekroju prostokątnym przy stosunku boków 2:1. W celu eliminacji wpływu obróbki oraz ujednorodnienia struktury, próbki przed obróbką wykańczającą wygrzewano w temperaturze 700°C i schładzano z piecem. Próby przeprowadzano z bardzo małą prędkością odkształcania równą $1,67 \times 10^{-5}$ 1/s dla odległości początkowej między szczękami 100 mm. Stosowanie tak małej prędkości wydłużania związane jest z gwałtownością procesu uplastyczniania (poślizgów plastycznych), które chciano rejestrować zwykłą kamerą cyfrową. Stanowisko badawcze na którym prowadzono próbę rozciągania przedstawiono na rys. 1, natomiast wykresy rozciągania badanych próbek stali St6 i stali 45 wraz z powiększonymi ich fragmentami platform plastycznych przedstawiono na rysunku 2, a charakterystyczne parametry tych stali w tabeli 1.

Tabela 1

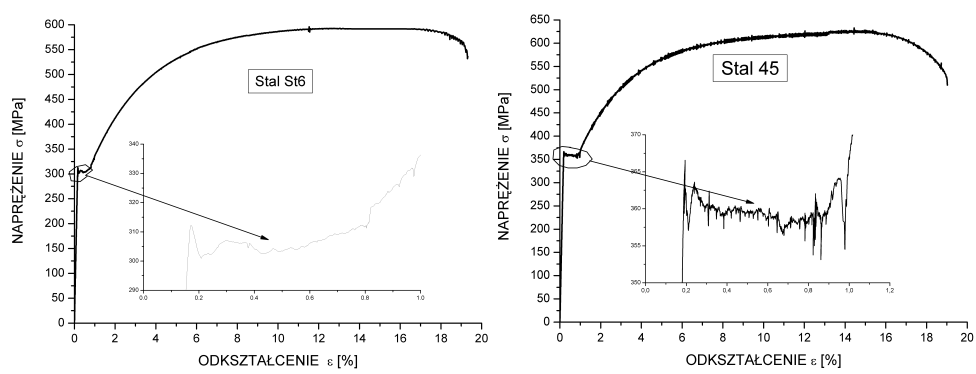
Marka stali	Górna granica plastyczności R_{eH} [MPa]	Dolna granica plastyczności R_{eL} [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Moduł Younga E [GPa]
45	377	367	625	207
St6	322	318	590	194

Próbę rozciągania wykonywano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON model 8511.20, rejestrując odkształcenie ekstensometrem o bazie pomiarowej 50 mm oraz rejestrując obrazy prążków interferencyjnych kamerą cyfrową z zachowaniem synchronizacji czasowej zapisu obu przebiegów. Umożliwia to przyporządkowanie punktom krzywej rozciągania odpowiadających im obrazów prążków interferencyjnych.



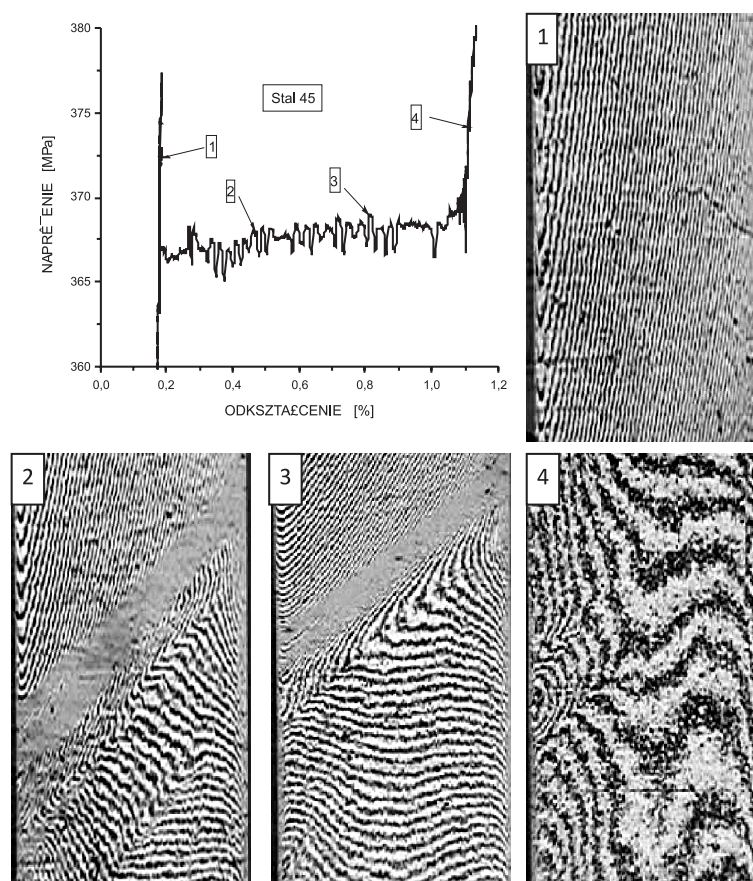
Rys. 1. Stanowisko badawcze do przeprowadzania prób rozciągania

Fig. 1. Tensile tests setup

Rys. 2. Wykresy rozciągania stali St6 i 45. $\dot{\nu}r = 1,67 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$ Fig. 2. Stress-strain diagrams for St6 and 45 Steels. $\dot{\nu}r = 1,67 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$

Sporządzone w klasycznej formie wykresy rozciągania obu badanych stali są bardzo podobne, co zapewne wynika z podobnej zawartości węgla. Powiększone fragmenty platform plastycznych wykazują pewne różnice, w szczególności platforma plastyczna stali St6 jest nieco krótsza niż stali 45 przy czym wartość średnia naprężenia nieco wzrasta. Można jednak różnić zakres platformy plastycznej stali St6 oraz następujący później zakres wzmocnienia plastycznego kiedy kąt nachylenia krzywej jest wyraźnie większy. Dla pełnej rzetelności badawczej należy zaznaczyć, że pokazane na rysunkach 3 i 4 fragmenty platform plastycznych obu badanych stali oraz związane z nimi obrazy prążków interferencyjnych uzyskano dla innych próbek niż próbki stanowiące podstawę wykresów z rysunku 2. Próbki te wykonano jednak z tych samych odcinków blach i tak samo obrabiano przed próbą.

2.3. Zestawienie i charakterystyka wyników badań

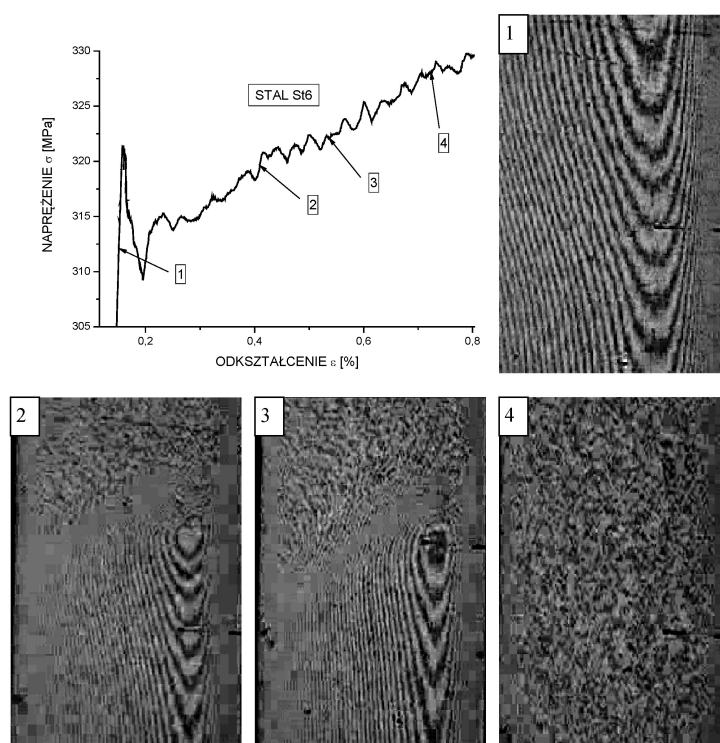


Rys. 3. Platforma plastyczna stali 45 z zaznaczonymi współrzędnymi $\sigma - \epsilon$ i odpowiadającymi im obrazami prążków interferencyjnych. Opis w tekście

Fig. 3. Yield plateau of 45 Steel with pictures of interference fringes corresponding to marked $\sigma - \epsilon$ coordinates. Further comments in the text

Kształt platformy plastycznej stali 45 z zaznaczeniem zjawisk występujących przy przejściu materiału próbki ze stanu sprężystego w stan plastyczny przedstawia rysunek 3, gdzie kolejnymi numerami fotografii prezentujących obrazy prążków interferencyjnych oznaczono punkty na wykresie $\sigma = f(\epsilon)$. Niewielkie wahania wartości naprężeń na platformie plastycznej o amplitudzie do 2 MPa utrzymują w przybliżeniu stałą prędkość rozprzestrzeniania się strefy plastycznej po długości próbki. Front strefy plastycznej przesuwa się wzdłuż próbki niewielkimi i regularnymi skokami pozostawiając między warstwami poślizgów niewielkie obszary sprężyste, w których uplastycznienie zachodzi z opóźnieniem.

Skumulowanie przemieszczeń końca próbki na 2–3 mm jej długości z jednoczesnym zmniejszeniem w tej strefie jej przekroju porzecznego, powoduje wzmocnienie plastyczne, co skutkuje ponownym wygładzeniem powierzchni i w konsekwencji przywróceniem zjawiska interferencji. Nowopowstałe prążki interferencyjne są inaczej ukształtowane niż prążki w strefie sprężystej. Prążki posiadają teraz odmienny kształt oraz drobne nieciągłości odzwierciedlające pojawiające się z rzadka na powierzchni krótkie linie Lüdersa. Dalszy wzrost obciążenia próbki powodujący wzrost zgniotu plastycznego wywołuje rozmywanie się prążków, a następnie ich zanik.



Rys. 4. Platforma plastyczna stali St6 z zaznaczonymi współrzędnymi $\sigma - \epsilon$ i odpowiadającymi im obrazami prążków interferencyjnych. Opis w tekście

Fig. 4. Yield plateau of St6 Steel with pictures of interference fringes corresponding to marked $\sigma - \epsilon$ coordinates. Further comments in the text

Znacząco powiększony obraz platformy plastycznej stali St6 wraz z obrazami prążków interferencyjnych przypisanych zaznaczonym punktom wykresu pokazano na rysunek 4. Podobnie jak w innych stalach typu St obraz prążków jest mniej ostry niż w stalach wyższej jakości. Wahania naprężeń w próbce z St6 są niewielkie i mniej regularne niż dla stali 45, również przebieg propagacji strefy plastycznej wykazywał mniejszą regularność niż miało to miejsce dla stali 45. Potwierdzają to nieregularne zarysy pasm bez prążków odpowiadających strefom zachodzącym w danej chwili poślizgów plastycznych. Zasadnicze cechy charakterystyczne zmian obrazu prążków interferencyjnych są jednak dla obu stali podobne. Dla stali St6 nie obserwuje się również zdolności do przywrócenia zjawiska interferencji, co zresztą jest charakterystyczne dla większości stali badanych przez autorów niniejszej pracy.

3. Powstawanie i propagacja uplastycznienia na przykładzie zginania belki

3.1. Wprowadzenie i metodyka badań

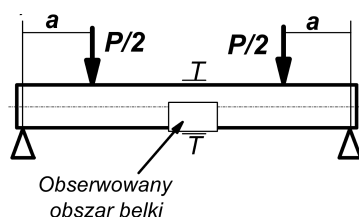
Cechą charakterystyczną zginania jest nierównomierny rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym belki po jego wysokości, co oznacza występowanie gradientu naprężeń. Przyjmuje się powszechnie, że uplastycznienie materiału następuje w większości przypadków wskutek poślizgów. W przypadku równomiernego rozkładu naprężeń poślizgi plastyczne mogą się dowolnie rozprzestrzeniać w płaszczyznach występowania τ_{\max} jak to ma miejsce w jednoosiowym i jednorodnym stanie naprężenia opisanym w punkcie 2. Występowanie gradientu naprężeń powoduje, że przekroczenie w danym punkcie ciała granicy plastyczności (wyznaczonej w próbie rozciągania) nie skutkuje natychmiastowym powstaniem poślizgu, ponieważ w punktach sąsiednich granica plastyczności nie została jeszcze osiągnięta.



Rys. 5. Stanowisko badawcze do prób czystego zginania

Fig. 5. Constant bending moment test stand

Uproszczony schemat uplastycznienia „punkt po punkcie”, zakładany w rozważaniach fenomenologicznej teorii plastyczności nie znajduje potwierdzenia w eksperymencie. Poślizg w warunkach gradientu naprężeń wymaga pewnej objętości, w której musi zostać zgromadzona nadwyżka energii sprężystej, konieczna do jego zainicjowania. Badania prezentowane poniżej przeprowadzono dla przypadku czystego zginania belki ze stali 45. Widok stanowiska badawczego dla zginania przedstawiono na rysunku 5, natomiast badaną próbkę pokazuje rysunek 6.



Rys. 6. Schemat belki do badania początków i propagacji stref plastycznych

Fig. 6. Layout of the beam for the research on plastic zones beginning and propagation

Na górnej i dolnej powierzchniach belki naklejono tensometry elektrooporowe T , co umożliwiło kontrolę zależności między naprężeniem nominalnym, a ekstremalnym odkształceniem. Sposób i metoda wyznaczania oraz rejestracji prążków interferencyjnych były analogiczne jak przy rozciąganiu próbki.

3.2. Opis zjawisk towarzyszących uplastycznieniu przy zginaniu belki

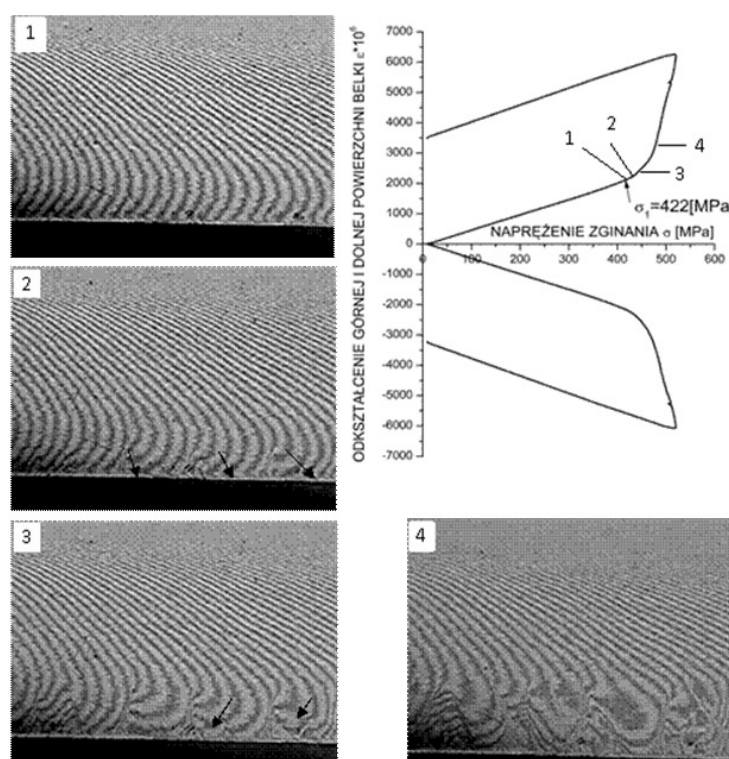
Zarejestrowane, zsynchronizowane w czasie obciążenie belki czyli nominalne naprężenie zginania:

$$\sigma_{gn} = \frac{M_g}{W_g} = \frac{P \cdot a}{2 \cdot W_g}$$

oraz odkształcenie wskazane przez tensometr i towarzyszące im obrazy prążków Interferencyjnych przedstawia rys. 7. Na wykresach zależności odkształcenia skrajnych włókien belki od naprężenia nominalnego σ_{gn} zaznaczono kolejnymi numerami punkty odpowiadające pokazanym obrazom prążków interferencyjnych.

Przedstawione na rys. 4 obrazy obejmują obszar belki nad dolnym tensometrem T , gdzie występuje dodatnie naprężenie. Wraz ze zmianą ugięcia belki widoczna jest ciągła zmiana położenia dolnej krawędzi belki wywołana jej przemieszczeniem względem płytki interferencyjnej w płaszczyźnie zginania. Zmianie ugięcia belki towarzyszy zmiana gęstości prążków interferencyjnych na wysokości belki, wywołana zmianą odległości między płytką a belką wskutek jej odkształceń. Obraz 2 na rysunku 7 przedstawia pierwsze poślizgi, których wynikiem są nieciągłości prążków na głębokość 0,15–0,2 wysokości belki od jej dolnej krawędzi, co zaznaczono strzałkami. Obraz 1 przedstawia natomiast ten sam obszar belki nieco wcześniej tzn. jeszcze w stanie sprężystym. Poślizgi występują równomiernie w przedziale stałego momentu zginającego belkę w odległościach, około 0,5–0,7 wysokości belki zarówno w strefie rozciąganej, jak i ściskanej. Poślizgi zaznaczają się jako nieciągłości prążków interferencyjnych, początkowo prostopadłych do powierzchni zewnętrznych belki, natomiast

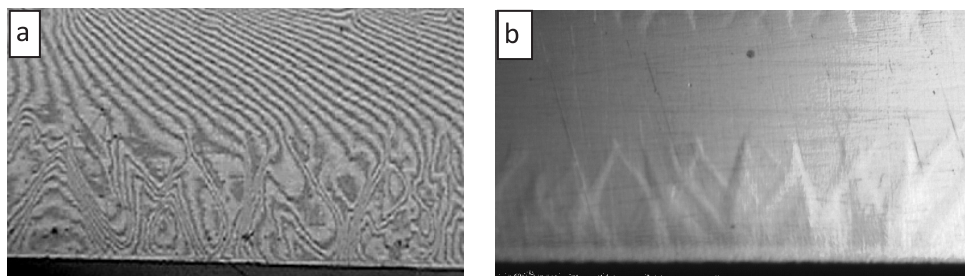
później uzupełniane są poślizgami nachylnymi pod kątem. Na skrajnych powierzchniach zewnętrznych belki (dolnej i górnej), po stronie rozciągania i ściskania jako sygnały wystąpienia pierwszych poślizgów pojawiają się równoległe linie Lüdersa, nachylone pod kątem 45° do krawędzi belki. Zarejestrowane maksymalne naprężenie nominalne w tej chwili czasu wynosiło 418 MPa, co oznacza przewyższenie górnej granicy plastyczności z próby rozciągania o około 11%. Dopiero później, gdy obciążenie wzrośnie o dalsze 5–8% , w połowie odległości między pierwotnymi poślizgami powstają uzupełniające poślizgi (rys. 7, obraz 3), których odzwierciedleniem na powierzchniach zewnętrznych belki są linie Lüdersa prostopadłe do już istniejących. Sprawia to że linia ugięcia belki staje się ponownie krzywą płaską leżącą w płaszczyźnie obciążenia.



Rys. 7. Propagacja strefy plastycznej w belce zginanej. Opis w tekście

Fig. 7. Plastic zone propagation in beam under bending. Further comments in the text

Zastosowane tensometry oporowe o bazie 1,5 [mm] nie zareagowały na wystąpienie pierwszych poślizgów plastycznych, gdyż powstały one poza ich bazą pomiarową. Tensometry odnotowały dopiero później wzrost liczby oraz rozrost poślizgów, wykazując nieproporcjonalny wzrost odkształceń – obrazy 3 i 4 (rys. 7). Na rysunku 8 pokazano obraz prążków interferencyjnych po odciążeniu belki (rys. 8a) oraz fotografię tych samych poślizgów plastycznych na powierzchni bocznej po odciążeniu (rys. 8b). Na obu rysunkach widoczne jest rozgraniczenie stref sprężystej i plastycznej.



Rys. 8. Skutki poślizgów plastycznych w belce po odciążeniu: 8a) prążki interferencyjne, 8b) poślizgi plastyczne na powierzchni bocznej

Fig. 8. The results of plastic slips in the beam after unloading: 8a) interference fringes, 8b) plastic slips on the side surface

Jak widać na rysunku 8b powierzchnia boczna belki posiada zagłębienia oraz wypukłości w kształcie trójkątów, których podstawy leżą na górnej i dolnej krawędziach belki. Na górnej i dolnej powierzchniach belki można obserwować (niewidoczne na rysunku), krzyżujące się ze sobą linie Lüdersa będące śladami poślizgów plastycznych.

4. Wnioski

Przedstawione w pracy, zaobserwowane w czynnym procesie obciążania, obrazy prążków interferencyjnych w statycznej próbie rozciągania potwierdzają skuteczność metody identyfikacji odkształceń plastycznych w stalach z niestatecznością materiałową.

Ciągła obserwacja układu prążków interferencyjnych na powierzchni bocznej zginanej belki o przekroju prostokątnym wskazuje, że powstawanie odkształceń plastycznych jest procesem dyskretnym i przebiega skokowo podobnie jak po osiągnięciu wartości wyraźnej granicy plastyczności w próbie rozciągania.

W fazie początkowej uplastycznienie nie wykazuje zgodności z opisem fenomenologicznej teorii plastyczności. Na znacznie późniejszym etapie awansowania odkształceń plastycznych można uzyskać zgodność analiz teoretycznych klasycznej teorii plastyczności z eksperymentem bazując na wartości dolnej granicy plastyczności stali 45.

Stwierdzono rozpoczęcie odkształceń plastycznych w zginanej belce przy naprężeniach przekraczających wyraźną granicę plastyczności. Podobne zjawisko wystąpiło w badaniu rozciąganej tarczy z otworem kołowym przeprowadzonym przez autorów [10]. Można sądzić, że jest to związane z koniecznością przekroczenia bariery energetycznej warunkującej rozpoczęcie poślizgów plastycznych przy występowaniu gradientu naprężeń.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy. Decyzja nr 2488/B/T02/2010/38.

Literatura

- [1] Theocaris S., Marketos E., *Elastic-plastic analysis of perforated thin strips of a strain-hardening material*, J. Mech. Phys. Solids, 11, 1964, 377-390.
- [2] Durelli A. J., Parks V.J., *Moire Analysis of Strain*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1970.
- [3] Brzoska Z., *Wytrzymałość Materiałów*, Warszawa 1973.
- [4] Szczepiński W., *Mechanika plastycznego płynięcia*, Warszawa 1978.
- [5] Kapkowski J. Słowikowska I. Stupnicki J., *Badanie naprężeń metodą elasto-optycznej warstwy powierzchniowej*, PWN, Warszawa 1987.
- [6] Bućko S., Jodłowski H., *Próba zdefiniowania granicy sprężystości w warunkach dużego gradientu naprężeń*, X Konferencja Mechaniki Pęknięcia, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, 304, Mechanika, 82, 2005.
- [7] Bućko S., Jodłowski H., *Powstawanie stref plastycznych w materiałach z fizyczną granicą plastyczności w świetle nowych metod badawczych*, Materiały X Krajowej Konferencji Wytrzymałości i Badania Materiałów, Kudowa Zdrój 2006.
- [8] Jodłowski H., *Metoda rozpoznawania odkształceń plastycznych w procesie obciążania stali wykazujących niestateczność materiałową*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
- [9] Jodłowski H., *Doświadczalne wyznaczenie stref plastycznych w stalach z wyraźną granicą plastyczności. Badania Eksperymentalne w Mechanice Ciała Stałego*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, 217, 2007.
- [10] Bućko S., Jodłowski H., *Inicjacja odkształceń plastycznych w stali z wyraźną granicą plastyczności w warunkach gradientu naprężeń*, Acta Mechanica et Automatica, Vol. 3, No. 1, 2009.