

POWSTAWANIE ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH W BELKACH PODDANYCH CZYSTEMU ZGINANIU

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, abies@mech.pk.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych nad inicjacją odkształceń plastycznych w stali z wyraźną granicą plastyczności w warunkach występowania gradientu naprężeń. W badaniach stosowano autorską metodę wykorzystującą interferencję optyczną do identyfikacji odkształceń plastycznych w stalach wykazujących tę właściwość. Badania wykonywano na zginanych belkach stało-momentowych wykonanych z stali St3 i stali45. Uzyskano obrazy stref plastycznych oraz ich propagacji po wysokości belek, co zostało udokumentowane na filmach CCD. Wyznaczono również wartości obciążenia odpowiadającego pierwszym odkształceniom plastycznym. Zaobserwowano, że pierwsze odkształcenia plastyczne są wynikiem poślizgów plastycznych rozłożonych dyskretnie po długości belki, co nie przystaje do założeń klasycznej teorii zginania sprężysto plastycznego.

1. WPROWADZENIE

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 zazwyczaj pełnym rzeczywistym eksperymentem. Nawet jeśli autorzy prowadzili badania doświadczalne to wynikiem pomiarów było wyznaczenie przemieszczeń względnie odkształceń bez weryfikacji ich sprężystości. Podobna metodyka stosowana jest przy wyznaczaniu stref plastycznych wokół czoła szczeliny. Granice stref plastycznych wyznaczane są już analitycznie z warunku plastyczności i są w związku z tym podobne do wykresów naprężeń dla zakresu sprężystego silnie zależne od postaci przyjętego warunku plastyczności. Stosowane dotychczas metody badawcze nie pozwalają na identyfikację odkształceń plastycznych w ich stadium początkowym w czynnym procesie obciążenia.

W ostatnich latach rozwinęły się badania zmierzające do wykrywania mikroślizgów plastycznych w skali jednego bądź kilku ziaren, które to poślizgi miałyby być świadectwem wystąpienia odkształceń plastycznych odpowiadających wyraźnej granicy plastyczności. Koncepcja ta budzi wątpliwości wobec faktu, że mikroślizgi w skali jednego lub kilku ziaren obserwowane były w zakresie naprężeń i odkształceń uważanych powszechnie za sprężyste – leżący znacznie poniżej wyraźnej granicy plastyczności. Należy przy tym pamiętać, że pojęcie wyraźnej granicy plastyczności odnosi się do stanu, w którym poślizgi plastyczne występują masowo w ziarnach o różnej orientacji a towarzyszące im odkształcenia są często o rząd większe od maksymalnych odkształceń sprężystych.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań procesu powstawania stref plastycznych w elementach wykonanych z dwóch gatunków stali z wyraźną granicą plastyczności przy zastosowaniu nowej, opracowanej przez autorów, metody identyfikacji makroodkształceń plastycznych opartej na wykorzystaniu interferencji optycznej (Bućko i Jodłowski, 2006; Jodłowski, 2007). Przedstawione badania obejmują weryfikację metody w statycznej próbie rozciągania, oraz identyfikację odkształceń plastycznych w dwóch belkach wykonanych z tych samych stali poddanych czystemu zginaniu. Dla wszystkich wymienionych eksperymentów pokazano wykresy zmierzonych odkształceń oraz obrazy stref plastycznych w początkowej fazie ich powstawania.

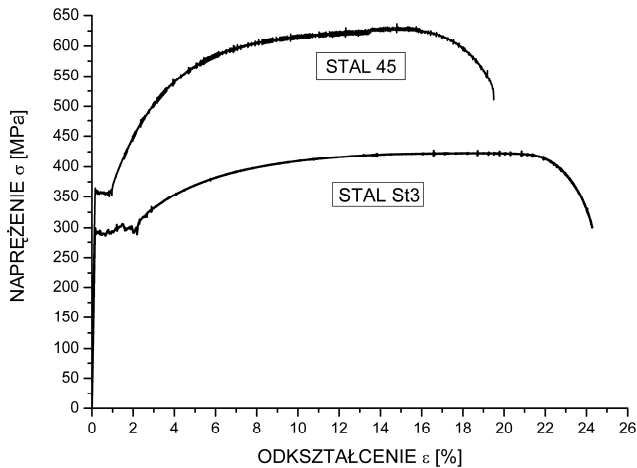
2. POWSTAWANIE I PROPAGACJA STREFY PLASTYCZNEJ NA PRZYKŁADZIE STATYCZNEJ PRÓBY ROZCIĄGANIA

2.1. Próbki i metoda badań

Istotą stosowanej metody identyfikacji odkształceń plastycznych w czynnym procesie obciążania jest wykorzystanie zjawiska interferencji optycznej światła monochromatycznego, a mianowicie: rozpoczęcie procesu powstawania makroodkształceń plastycznych w próbce z wyraźną granicą plastyczności powoduje w strefie plastycznej zanik zjawiska interferencji optycznej występującej wcześniej na wypolerowanej powierzchni próbki, co oznacza zanik prążków interferencyjnych.

Wykorzystanie zjawiska interferencji optycznej narzuca konieczność stosowania próbek z płaskimi powierzchniami, w rozpatrywanych eksperymentach były to próbki o prze-

króju prostokątnym przy stosunku boków 2:1. W celu eliminacji wpływu obróbki oraz ujednorodnienia struktury, próbki przed obróbką wykańczającą wygrzewano w temperaturze 700°C i chłodzono z piecem. Próby przeprowadzano z bardzo małą prędkością odkształcania równą $1,67 \times 10^{-5}$ 1/s dla odległości początkowej między szczękami 100mm. Stosowanie tak małej prędkości wydłużania związane jest z gwałtownością procesu uplastyczniania (poślizgów plastycznych), które chciano rejestrować kamerą cyfrową. Wykresy rozciągania przedstawione na Rys. 1, natomiast charakterystyczne parametry badanych stali zestawiono w Tab. 1.



Rys. 1. Wykresy rozciągania badanych stali, $V_r = 1,67 \times 10^{-5}$ 1/s

Tab. 1. Zestawienie podstawowych własności wytrzymałościowych badanych stali

Gatunek stali	Moduł Younga E	Granica Plastyczności Re	Wytrzymałość na zerwanie Rm	Odształcenie przy zerwaniu ϵ_u
	GPa	MPa	MPa	%
St3	198	295	425	24
45	207	375	625	19

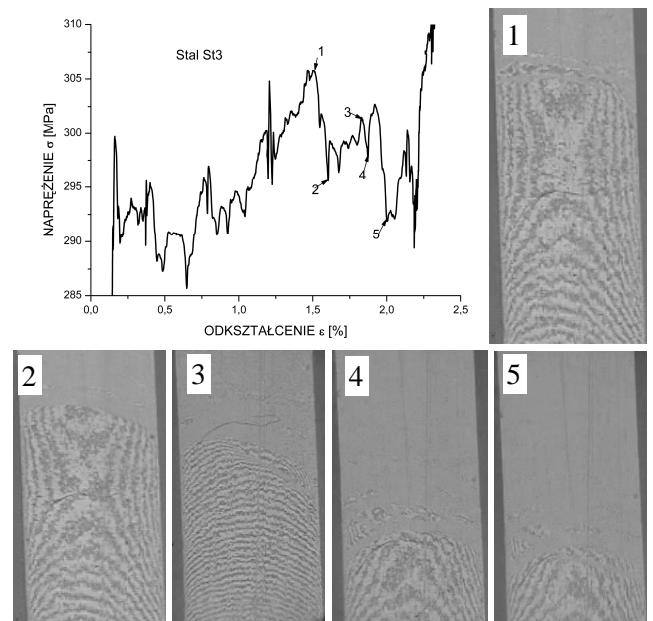
ϵ_u – odkształcenie bazy pomiarowej ekstensometru (50 mm) przy zerwaniu

Próby rozciągania obu stali wykonywano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON model 8511.20 rejestrując odkształcenie ekstensometrem o bazy pomiarowej 50mm oraz rejestrując obrazy prążków interferencyjnych kamerą cyfrową z zachowaniem synchronizacji czasowej zapisu obu przebiegów, co stwarza możliwość przyporządkowania punktom krzywej rozciągania odpowiadających im obrazów prążków interferencyjnych.

2.2. Zestawienie i charakterystyka wyników badań

Typowy przebieg platform plastycznych stali St3 i 45 z zaznaczeniem zjawisk występujących przy przejściu materiału próbek ze stanu sprężystego w stan plastyczny przedstawia Rys. 2 i Rys. 3, gdzie kolejnymi numerami fotografii przedstawiających obrazy prążków interferencyjnych oznaczono punkty na wykresie $\sigma = f(\epsilon)$. Cechą charakterystyczną wykresu rozciągania stali St3 jest stosunkowo duża platforma plastyczna z występującymi na niej znacznymi waha-

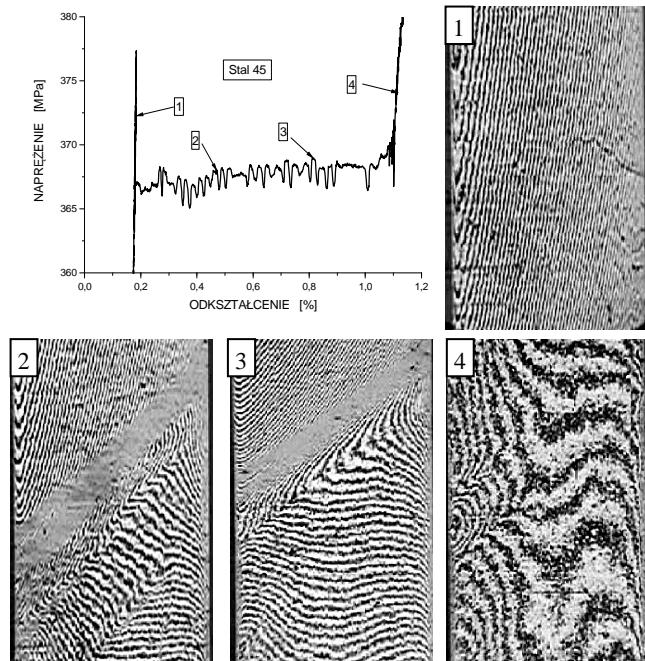
niami naprężeń (do 20MPa). Skorelowanie czasów nagrywania filmów video i realizacji wykresu rozciągania umożliwiło dokładne przyporządkowanie rejestrowanego obrazu prążków współrzędnym wykresu rozciągania. Pozwoliło to na sformułowanie kilku spostrzeżeń dotyczących propagacji stref plastycznych w stalach niskowęglowych w jednorodnym stanie naprężeń. Wielkość wahań naprężeń na platformie plastycznej związana jest z odległością nowej warstwy poślizgów od istniejącej już strefy plastycznej. Im większa ta odległość tym większy przyrost naprężeń. Zapoczątkowanie nowych warstw poślizgów następuje przy lokalnym maksimum obciążenia i naprężenia. Przejście oddzielonych od strefy sprężystej obszarów jeszcze sprężystych w stan plastyczny następuje najintensywniej, gdy wartość naprężenia spada i osiąga lokalne minimum. Niezależnie od wymienionych wcześniej zjawisk na styku obu stref w sposób ciągły występuje zanikanie strefy sprężystej. Powstawanie warstw poślizgów w płaszczyznach prostopadłych do poślizgów już istniejących, następuje przy wzrastających naprężeniach średnich platformy plastycznej, co zwykle ma miejsce w drugiej jej połowie. Nie stwierdzono jednoczesnego występowania poślizgów w dwu prostopadłych płaszczyznach.



Rys. 2. Platformy plastyczne stali St3 z zaznaczonymi współrzędnymi $\sigma - \epsilon$ i odpowiadającymi im obrazami prążków interferencyjnych (opis w tekście)

Objętość próbki, w której zachodzą procesy uplastycznienia jest zmienna w czasie. Wymiar tej strefy mierzony po długości próbki waha się od około 1mm do 10mm i wydaje się, że jest związana z wymiarami poprzecznymi próbki. W tych wymiarach na platformie plastycznej skumulowane jest całe przemieszczenie końca próbki wywołując na tak krótkim odcinku odkształcenie równe odkształceniu platformy i powodując jednocześnie zmniejszenie przekroju poprzecznego próbki. Powoduje to zapewne początki wzmocnienia plastycznego wygładzającego powierzchnię; które nie wystarcza jednak do przywrócenia zjawiska interferencji. Próby rejestracji interferencji w procesie wzmocnienia plastycznego statycznej próby rozciągania stali St3

nie powiodły się. Pofalowanie, zwichrzenie powierzchni powstałe w chwili uplastycznienia jest zbyt duże, aby później następujące wzmocnienie plastyczne mogło przywrócić jej oznaki gładkości.



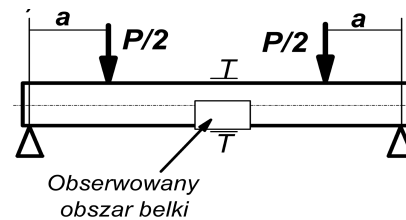
Rys. 3. Platformy plastyczne stali 45 z zaznaczonymi współrzędnymi $\sigma - \epsilon$ i odpowiadającymi im obrazami prążków interferencyjnych (opis w tekście)

Proces powstawania i propagacji strefy plastycznej w stali węglowej o zawartości węgla powyżej 0,4% wykazuje odmienne cechy, a w szczególności większą regularność. Na rys.3 przedstawiono platformę plastyczną stali gatunku 45 (zawartość węgla $0,4 \pm 0,5\%$) z zaznaczonymi współrzędnymi $\sigma - \epsilon$ i odpowiadającymi im obrazami prążków interferencyjnych. Propagacja odkształceń plastycznych występuje tutaj płynnie w bardzo małych częściach objętości próbki. Niewielkie pulsacje naprężeń o wartościach do 2MPa utrzymują w przybliżeniu stałą prędkość rozprzestrzeniania się strefy plastycznej po długości próbki. Skumulowanie przemieszczeń końca próbki na $2 \div 3\text{mm}$ 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. Nowo powstałe prążki interferencyjne są inaczej ukształtowane niż prążki w strefie sprężystej. Prążki posiadają teraz drobne nieciągłości odzwierciedlające pojawiające się z rzadka na powierzchni krótkie linie Lüdersa. Kształt prążków normalnie związany jest z płaskością powierzchni próbki kształtowaną przypadkowo w procesie ręcznego polerowania; tutaj uplastycznienie zmienia rzeźbę powierzchni i prążki przyjmują kształty otrzymane, których jest mało prawdopodobne przez ręczne polerowanie. Dalszy wzrost obciążenia próbki, powodujący wzrost zgniotu plastycznego, wywołuje rozmywanie się prążków a następnie ich zanik.

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. Inaczej ujmując występuje tutaj gradient naprężeń. Przyjmuje się powszechnie, że uplastycznienie materiału następuje wskutek poślizgów. W przypadku równomiernego rozkładu naprężeń poślizgi plastyczne mogą się dowolnie rozprzestrzeniać w płaszczyznach występowania τ_{max} , jak to ma miejsce w jednoosiowym stanie naprężenia opisanym w p. 2. W rozważanym przypadku wytrzymałościowym, rozpoczęcie poślizgu w nowej płaszczyźnie wymaga nadwyżki energii. Występowanie gradientu naprężeń powoduje, że przekroczenie w danym punkcie ciała granicy plastyczności nie skutkuje natychmiastowym powstaniem poślizgu, ponieważ w punktach sąsiednich granica plastyczności nie została osiągnięta. Poślizg w takim przypadku wymaga pewnej objętości, w której musi zostać zgromadzona konkretna nadwyżka energii sprężystej, konieczna do jego zainicjowania. Badania przeprowadzono w przypadku zginania, na belkach stało-momentowych wykonanych ze stali St3 i 45, rys.4.



Rys. 4. Rysunek belki do badania początków i propagacji stref plastycznych

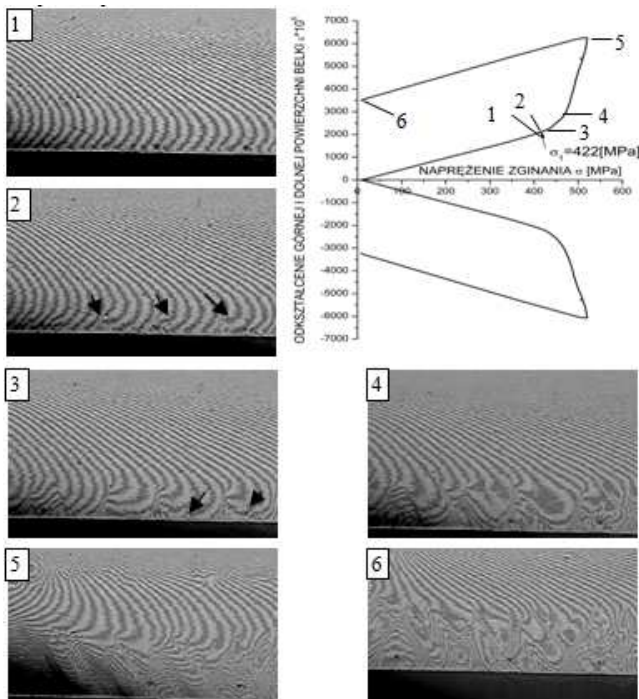
Na górnej i dolnej powierzchni badanych belek naklejono tensometry elektrooporowe T. Umożliwiło to kontrolę zależności między naprężeniem nominalnym a ekstremalnym odkształceniem. Sposób i metoda wyznaczenia oraz rejestracji prążków interferencyjnych były analogiczne, jak przy rozciąganiu próbek omówionym w p. 2.

3.2. Opis zjawisk towarzyszących uplastycznieniu belek zginanych

Zarejestrowane, zsynchronizowane w czasie obciążenie belki, czyli również naprężenie zginania, odkształcenie wskazane przez tensometr i towarzyszące im obrazy prążków interferencyjnych przedstawiają rys. 5 i 7. Na przedstawionych wykresach zależności odkształcenia skrajnych włókien belek od obliczonego naprężenia nominalnego zaznaczono kolejnymi numerami punkty odpowiadające pokazanym obrazom prążków interferencyjnych.

Przedstawione obrazy obejmują obszar belki nad dolnym tensometrem T, gdzie występuje dodatnie naprężenie, rys. 5.

Wraz ze zmianą ugięcia belki widoczna jest ciągła zmiana położenia jej dolnej krawędzi wywołana przemieszczeniem względem płytki interferencyjnej w płaszczyźnie zginania. Zmianie ugięcia belki towarzyszy zmiana gęstości prążków interferencyjnych na wysokości belki, wywołana zmianą jej przekroju poprzecznego, a tym samym zmianą odległości między płytką a belką. Obraz 2 na rys. 5 przedstawia pierwsze poślizgi, których wynikiem są nieciągłości prążków na głębokość $\frac{1}{6} - \frac{1}{5}$ wysokości belki od jej dolnej krawędzi, co zaznaczono strzałkami. Obraz 1 przedstawia ten sam obszar belki, lecz o sekundę wcześniej. Poślizgi występują równomiernie w przedziale stałego momentu zginającego belkę w odległościach, co $\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$ wysokości belki zarówno po jej stronie rozciąganej, jak i ściskanej. Poślizgi widoczne jako nieciągłości prążków interferencyjnych początkowo są prostopadłe do powierzchni zewnętrznych belki, później uzupełniane są o poślizgi nachylone pod kątem. Na skrajnych powierzchniach zewnętrznych belki, po stronie rozciągania i ściskania jako sygnały wystąpienia pierwszych poślizgów pojawiają się równoległe linie Lüdersa, nachylone pod kątem 45° do krawędzi belki. Zarejestrowane naprężenie zginania w tym momencie wynosiło 418MPa, która to wartość przewyższa górną wyraźną granicę plastyczności z próby rozciągania o 11,5%. Dopiero nieco później, gdy naprężenie zginania wzrosło o dalsze 20÷40MPa w połowie odległości między wcześniej powstałymi poślizgami powstają uzupełniające poślizgi (rys. 5 obraz 3), których odzwierciedleniem na powierzchniach zewnętrznych belki są linie Lüdersa prostopadłe do już istniejących. Sprawia to, że linia ugięcia belki pozostaje krzywą płaską i płaszczyzna zginania belki pokrywa się z płaszczyzną obciążenia.



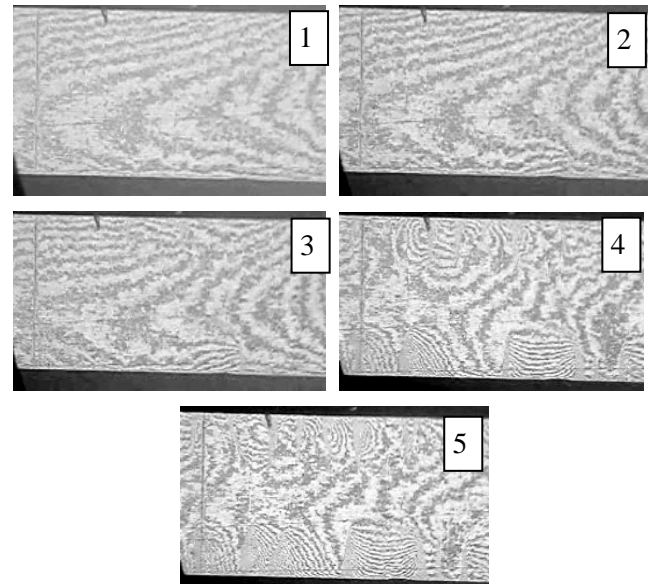
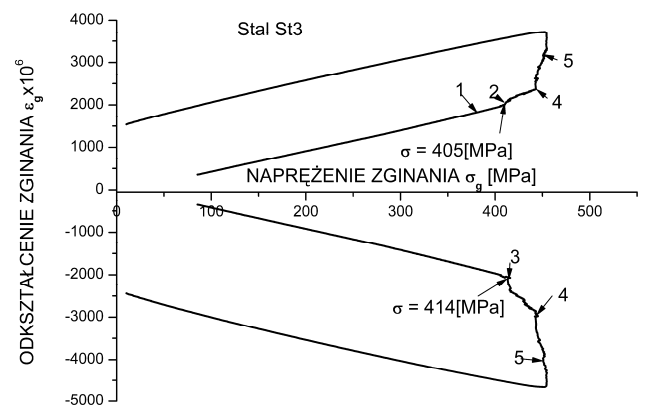
Rys. 5. Propagacja strefy plastycznej w belce zginanej. Stal 45. (opis w tekście)

Zastosowane tensometry pomiarowe o bazie 1,5mm nie zareagowały na zaistniały stan odkształcenia, ponieważ

poślizgi wystąpiły poza ich bazą pomiarową. Odnotowały tylko późniejszy rozrost poślizgów, co objawia się nieproporcjonalnym zwiększeniem odkształceń – obrazy 3, 4, 5. Obraz 6 przedstawia prążki interferencyjne po odciążeniu belki. Widok tych samych poślizgów plastycznych na belce po odciążeniu przedstawia fotografia na rys.6. Widoczne jest wyraźne rozgraniczenie stref plastycznych i strefy sprężystej. W strefie rozciągania odkształcenia plastyczne widoczne są jako zapadnięcia powierzchni, a w strefie ściskania jako jej uwypuklenia.



Rys. 6. Poślizgi plastyczne w belce zginanej stałym momentem



Rys. 7. Propagacja strefy plastycznej w belce zginanej. Stal St3. (opis w tekście)

Na rys. 7 przedstawione są obrazy prążków interferencyjnych obejmujące odcinek belki wykonanej ze stali St3 na całej wysokości przekroju. Pojawiające się pierwsze poślizgi występują w miarę równomiernie w przedziale stałego momentu zginającego belkę w odległościach, co $1 - \frac{5}{4}$ wysokości belki. Obraz 2 na rys.7 przedstawia pierwsze poślizgi na części rozciąganej belki, które są widoczne jako

nieciągłość prążków na głębokość do $\frac{1}{6} - \frac{1}{5}$ wysokości belki od jej dolnej krawędzi, co zaznaczono strzałką. Naprężenie zginania w tym momencie wynosi 414MPa i przekracza górną granicę plastyczności o 42%. Pierwsze poślizgi w części ściskanej belki pojawiają się nieznacznie później, co zaznaczono strzałką (obraz 3 na rys.7). Od tej chwili następuje nieproporcjonalny wzrost odkształceń mierzonych tensometrami elektrooporowymi. Na obrazie prążków interferencyjnych poślizgi są widoczne w postaci nieciągłości prążków. Nieciągłości te na powierzchniach bocznych są prostopadłe do krawędzi zewnętrznych belki.

W tym momencie na powierzchniach górnych i dolnych obu belek, badanych gatunków stali pojawiają się pierwsze linie Lüdersa nachylone pod kątem 45° do krawędzi belek są odzwierciedleniem nieciągłości prążków interferencyjnych na ich powierzchniach bocznych. Powstające w belce pierwsze odkształcenia plastyczne są wynikiem poślizgów plastycznych rozłożonych w sposób dyskretny po długości belki, co nie przystaje do założeń klasycznej teorii zginania sprężysto-plastycznego.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że proces powstawania odkształceń plastycznych w stałomomentowej zginanej belce z materiału z wyraźną granicą plastyczności przebiega w sposób dyskretny oraz „lawinowy”, tj. istotnie odmienny od schematów przyjętych w fenomenologicznej teorii plastyczności.

Można przypuszczać, że wartość naprężeń granicznych (inicjujących odkształcenia plastyczne) związana jest z gradientem naprężeń i długością platformy plastycznej badanej stali.

Uzyskane wyniki potwierdzają wcześniej uzyskane przez autorów rezultaty dla stanów naprężenia z gradientem, np. wokół otworu w rozciąganej tarczy, gdzie również inicjacja pierwszych odkształceń plastycznych występowała dla naprężeń przekraczających wyraźną granicę plastyczności.

Można oczekiwać, że kontynuacja badań tego typu pozwoli na wyznaczenie bądź oszacowanie wartości bariery energetycznej niezbędnej do uruchomienia poślizgów plastycznych.

LITERATURA

1. **Bućko S., Jodłowski H.** (2006), Powstawanie stref plastycznych w materiałach z fizyczną granicą plastyczności w świetle nowych metod badawczych, *Materiały X Krajowej Konferencji Wytrzymałości i Badania Materiałów*, Kudowa Zdrój.
2. **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.

THE INITIATION OF PLASTIC DEFORMATIONS IN BEAMS UNDER PURE BENDING

Abstract: The results of experiment on plastic deformation initiation in steel with physical field point under stress gradient action are presented in the work. The authorship method based on using optical interference effect to identify plastic deformations in steels exhibit material instability was applied to the tests. The experiments were carried out on beam specimens made of St3 steel and 45 steel put to the constant moment bending tests. The images of plastic zones distribution and their propagation along the beam height were observed and documented on CCD films. Also the load values correspond to first plastic deformations in the specimen were determined. It was observed that the first plastic deformations are the results of plastic slips distributed discretely along the beam specimen longitude.