

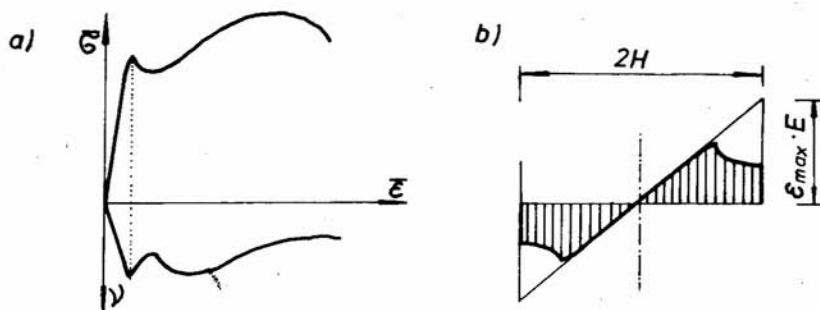
Leszek Chodor, Zbigniew Kowal  
Jerzy Sendkowski  
Politechnika Świętokrzyska

DOŚWIADCZALNE WYZNACZENIE NIEZALEŻNEGO OD PRĘDKOŚCI  
ODKSZTAŁCEN MODELU ZGINANIA STALI NISKOWĘGŁOWEJ

1. Wprowadzenie

W pracy [1] podano wyniki niekonwencjonalnych badań stali niskowęglowej na rozciąganie, stanowiące podstawę do określenia losowej ścieżki równowagi statycznej elementu rozciąganego. Przez statyczną ścieżkę równowagi elementu rozciąganego /SSRR/ rozumie się niezależny od prędkości odkształceń związek pomiędzy odkształceniem a naprężeniem.

SSRR określa statyczny model rozciągania stali i ma postać, pokazaną na rysunku 1a [1], w którym  $\gamma$  oznacza współczynnik zmienności naprężenia  $\sigma$ . Z modelu pokazanego na rysunku 1a wynika rozkład naprężeń normalnych w przekroju prostokątnym elementu zginanego pokazany na rysunku 1b.



Rys.1. a/ Statyczny model rozciągania stali, b/ Rozkład naprężeń normalnych w przekroju elementu zginanego wynikający z SSRR

W celu zbadania przydatności statycznego modelu rozciągania stali do wyznaczania rozkładów naprężeń w przekrojach elementów zginanych i szacowania parametrów trwałej statycznej nośności losowej belek, przeprowadzono niekonwencjonalne badania stali niskowęglowej na zginanie. Określono statyczną ścieżkę równowagi zginania stali /SSRZ/ stanowiącą statyczny model zginania stali. SSRZ określa statyczną zależność przemieszczenia od obciążenia momentem zginającym.

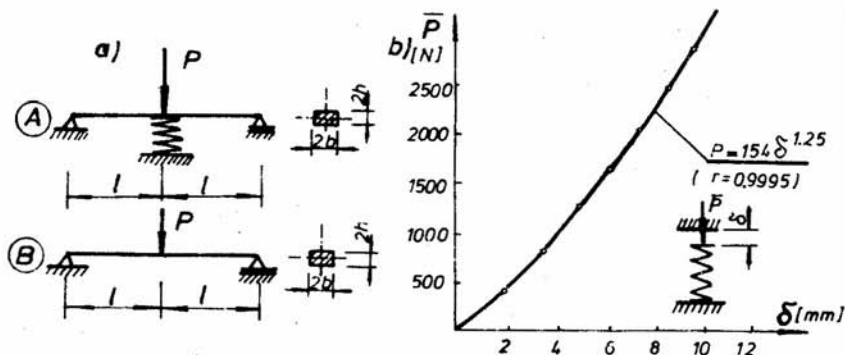
Do wyznaczania SSRZ przyjęto przemieszczenia charakterystyczne, to znaczy takie ekstremalne przemieszczenia, które dobrze charakteryzują kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia.

Zbadano również wpływ niezależnego od prędkości odkształceń modelu zginania stali na redystrybucję sił wewnętrznych pomiędzy elementem pracującym w obszarze pozasprężystym a elementem sprężystym.

## 2. Opis badań

Badania przeprowadzono na dwóch seriach modeli ze stali St3S po 5 belek w każdej /rys.2a/. Parametry statystyczne badanych belek wyniosły: długość przęsła  $\bar{2l} = 200$  mm,  $D/2l = 4,2$  mm, wysokość oraz szerokość przekroju belek serii A -  $\bar{2h} = 10,01$  mm,  $D/2h = 0,4$  mm,  $\bar{b} = 19,96$  mm,  $D/b = 0,08$  mm dla serii belek B -  $\bar{2h} = 9,99$  mm,  $D/2h = 0,06$  mm,  $\bar{b} = 20,02$  mm,  $D/b = 0,08$  mm.

Podporę sprężystą belek serii A wykonano ze sprężyny walcowej o charakterystyce aproksymowanej krzywą regresji  $\bar{P}(\delta)$  wg rysunku 2b. Współczynnik korelacji z pomiarami doświadczalnymi wyniósł  $r = 0,9995$ . Badania kontrolne prób serii B przeprowadzono bez podpory sprężystej.

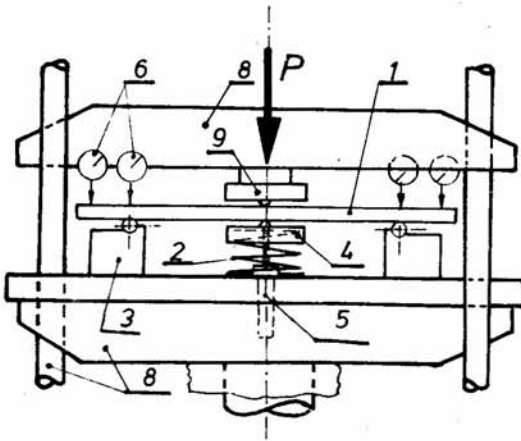


Rys.2. a/ Schemat modeli A i B, b/ Charakterystyka podpory sprężystej

Badania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej ZD-10 produkcji NRD. Model 1 umieszczono na podporach przegubowych 3 /rys.3/. Czujniki zegarowe 6 służyły do określenia kąta obrotu belki nad podporą. Analiza wyników badania próbnego wykazała nieistotny wpływ przemieszczeń belki i warunków brzegowych na przekrojowy moment zginający w środku belki a także na jej wyężenie. Obciążenie P z maszyny wytrzymałościowej 8, przekazywano na próbkę 1 poprzez stempel obciążający 9, zakończony walcową końcówką.

Podpora sprężysta 2 w serii prób A modelowała redystrybucję sił pomiędzy elementem sprężystym 2 i sprężysto-plastycznym 1. Sprężyna 2 umożliwiła również zastosowanie procedury pozwalającej na wyznaczenie niezależnej od prędkości odkształceń ścieżki równowagi  $M(\delta)$  i określenia zależności

obciążenia  $\bar{P}$  od trwałej strzałki ugięcia  $\delta$  belki w warunkach kontrolowa - nych.



Rys.3. Stanowisko badawcze

Część obciążenia  $P$  przejmowa - ną przez sprężynę  $P_s$  odczyty - wano za pomocą przetwornika tensometrycznego 4. Obciążenie belki wyznaczono wzorem  $P - P_s$ . Odpowiadające ugięcie odczyty - wano za pomocą czujnika indu - kcyjnego PR 9314 A/20/Philips/ 5. W przypadku płynięcia plas - tycznego belki obciążenie  $P$  zmniejszono aż do zaniknięcia płynięcia. Przy powtórnym zwiększaniu obciążenia obser - wowano początek płynięcia i na podstawie takiej procedury [1] wyznaczono niezależną od pręd - kości odkształceń ścieżkę równowagi  $M(\delta)$ .

### 3. Doświadczalna ścieżka równowagi statycznej $M$

Staticzną ścieżkę równowagi  $M(\delta)$  dla serii prób A z podporą sprężys - tą, pokazano na rys.4a linią ciągłą, w postaci wykresów średniego obciąże - nia belki  $\bar{M}$  i współczynnika zmienności  $\nu_M$  w funkcji ugięcia  $\delta$ .

Na rys.4b pokazano ścieżkę równowagi  $M(\delta)$  belek serii B bez sprężys - tej podpory wykonaną konwencjonalnie, odczytując współrzędne  $M(\delta)/co$  0,5 godziny.

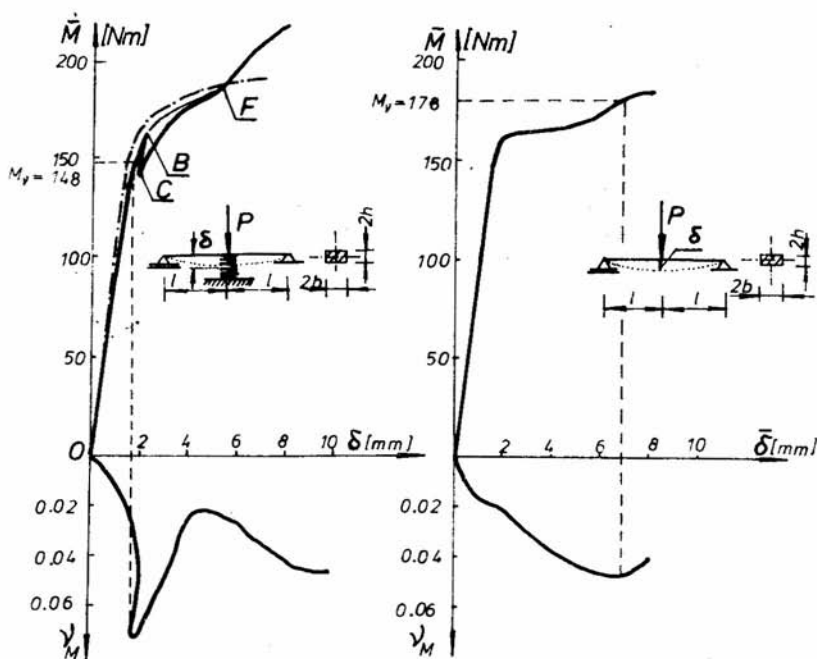
Na podstawie ścieżek równowagi otrzymanych z doświadczeń /rys.4/ okre - siono losową nośność graniczną elementu zginanego w sposób pokazany w pracy [2]. Losowa nośność graniczna elementów badanych wyniosła  $M_y = 148$  Nm,  $\nu_M = 0,076$  dla serii A elementów i  $M_y = 179$  Nm,  $\nu_M = 0,045$  dla serii B. Nośność tą określono na podstawie obciążenia odpowiadającego maksimum współczynnika zmienności  $\nu_p$ , [2].

Nieliniowy odcinek  $M(\delta)$  charakteryzujący ustrój statycznie niewyzna - czalny wykazuje charakterystyczny punkt krytyczny B po którym następuje "tąpnięcie" belki. Takiego punktu krytycznego nie obserwuje się w konwen - cjonalnych badaniach, za pomocą których daje się określić dynamiczną a nie statyczną ścieżkę równowagi  $M(\delta)$ .

Należy nadmienić, że dynamiczne ścieżki równowagi /DSRZ/ elementu zgi - nanego przebiegają powyżej linii BCF to znaczy powyżej SSRZ. Położenie DSRZ zależne jest od prędkości odkształceń w strefach uplastycznienia belki.

Nieoczekiwane anomalie statycznej ścieżki równowagi  $M(\delta)$  belki zgin - nej w układzie statycznie niewyznaczalnym w porównaniu z dynamiczną

ścieżką równowagi statycznie wyznaczalnej belki zginanej wskazują na potrzebę przeprowadzenia dalszych badań kontrolnych.



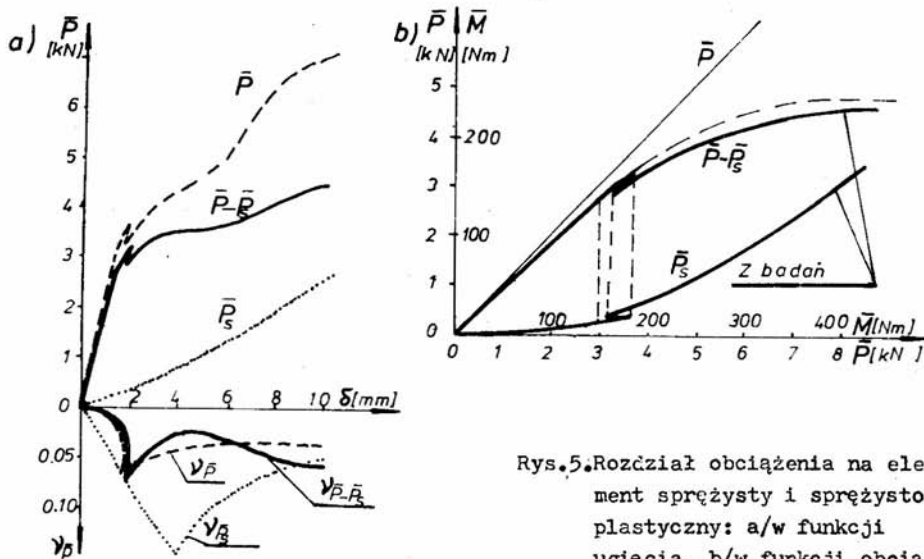
Rys.4, a/ Średnia SSRZ belek hiperstatycznych A, b/ Średnia dynamiczna ścieżka równowagi belek B bez sprężystej podpory.

#### 4. Rozdział obciążenia pomiędzy elementem sprężystym i sprężysto-plastycznym w ustroju hiperstatycznym

Na rys.5a pokazano linią przerywaną zależność średniego przemieszczenia  $\bar{\delta}$  całego badanego układu hiperstatycznego od średniego obciążenia  $\bar{P}$ , oraz wynikający z badań rozdział obciążenia  $\bar{P}$  na układ sprężysty /sprężynę - w części  $\bar{P}_s$ , i układ sprężysto-plastyczny /belkę - w części  $\bar{P} - \bar{P}_s$  w funkcji średniego przemieszczenia  $\bar{\delta}$ . Na rys.5a pokazano również odpowiednie współczynniki zmienności  $\nu_P$ .

Na rys.5b pokazano przydział obciążenia  $\bar{P} - \bar{P}_s$  na układ sprężysto-plastyczny oraz przydział obciążenia  $\bar{P}_s$  na układ sprężysty w funkcji obciążenia całkowitego  $\bar{P}$ .

Przydział obciążenia na belkę zginaną wynikający z konwencjonalnego modelu Prandtla /przy przyjęciu w nim górnej granicy plastyczności/ pokazano na rys.5a linią przerywaną. Widać istotną różnicę w prognozie rozdziału obciążenia pomiędzy elementami pracującymi w zakresie sprężystym a elementami zginanymi w obszarze sprężysto-plastycznym na podstawie modelu materiału Prandtla oraz na podstawie badań.



Rys.5. Rozdział obciążenia na element sprężysty i sprężysto-plastyczny: a/w funkcji ugięcia, b/w funkcji obciążenia całkowitego

### 5. Oszacowanie statycznej ścieżki równowagi elementu zginanego na podstawie modelu statycznego rozciągania stali niskowęglowej

Na podstawie przedstawionego w [1] modelu statycznego rozciągania stali można teoretycznie oszacować statyczną ścieżkę równowagi zginania stali. Zakładając, że losowy proces odkształcenia elementów rozciąganych jest reprezentatywny dla całej populacji elementów wykonanych ze stali niskowęglowej, oszacowano ścieżkę równowagi  $M(\delta)$  belki zginanej przyjmując za miarodajne odpowiednio skorygowane liczbowe charakterystyki uzyskane z badań [1]:

Przeprowadzono obliczenia numeryczne SSRZ pomijając wpływ sił stycznych na przemieszczenia. Przyjęto ponadto słuszność założenia Bernoulliego o płaskich przekrojach. Wyniki obliczeń numerycznych naniesiono na wykres rys. 4a linią kropka-kreska.

Porównanie z ugięciami otrzymanymi doświadczalnie wskazują na:

- 1/Dobrą jakościową zgodność oszacowania w obszarze 0-B,
- 2/Możliwość określenia statycznej ścieżki równowagi elementów zginanych na podstawie statycznego modelu  $\sigma(\epsilon)$  materiału belki,
- 3/Niezgodności teoretycznego i doświadczalnego oszacowania SSRZ elementu zginanego w obszarze B-C-F. Niezgodności te wynikają z pominięcia naprężeń stycznych na SSRZ w badaniach teoretycznych.

Konieczne jest przebadanie wpływu sił poprzecznych na SSRZ i proces zniszczenia elementów zginanych. Wpływ naprężeń stycznych na wytężenie przekroju jest istotny w przekrojach częściowo uplastycznionego obszaru belki i zwiększa się w miarę zwiększania się tego obszaru.

## 6. Podsumowanie, uwagi i wnioski

Przedstawiona metoda doświadczalnego wyznaczania SSRZ elementów zginanych pozwala wraz z pokazaną w pracy [1] metodą doświadczalnego wyznaczania SSRR rozciągania stali na:

wyeliminowanie wpływu pełzania na ścieżkę równowagi trwałej belek zginanych,

oszacowanie parametrów trwałej nośności granicznej elementów zginanych, oszacowanie niezależnego od prędkości przemieszczeń rozdziału obciążenia pomiędzy układ sprężysty i sprężysto-plastyczny,

prognozowanie statycznej ścieżki równowagi przy zginaniu na podstawie statycznej ścieżki równowagi przy rozciąganiu stali,

Omówione badania wskazują na potrzebę badania wpływu sił stycznych na przemieszczenia i redystrybucję naprężeń w obszarze pozasprężystym.

Przedstawione wyniki badań sygnalizują jakościowy charakter trwałej ścieżki równowagi elementów zginanych. W celu otrzymania wyników ilościowych, nadających się do wykorzystania w praktyce, potrzebne są dalsze badania doświadczalne według schematu przedstawionego w pracy.

## Wykaz literatury

- [1] Kowal Z., Sendkowski J., Próba doświadczalnego wyznaczania niezależnego od czasu modelu stali niskowęglowej, XXVIII Konf. Naukowa KILiW PAN i KNPZITB, Warszawa/Krynica 1982.
- [2] Biegus A., Kowal Z., Seidel W., Investigation on the random ultimate bearing capacity of beam in bending, 7-th Congress on Material Testing, Budapest 1978.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MODEL OF BENDING LOW-CARBON  
STEEL IRRESPECTIVE OF STRAIN RATE

Summary

The paper provides the results of an experimental investigation aimed at the determination of the static track of equilibrium of beam bending irrespective of strain rate. The determined stable track of equilibrium corresponds to a set of equilibrium points in the space of external bending moments and deflections of characteristic points of the beam at strain rate approaching zero. The results of an investigation of the division of external load into elastic and elastic-plastic systems are presented. A method of forecasting stable static track of equilibrium during bending on the basis of static track of equilibrium during tension is shown.