

WYBOCZENIE PRĘTÓW STAŁOWYCH PODDANYCH WSTĘPNYM WYDŁUŻENIOM TRWAŁYM

JAN GRABOWSKI (WARSZAWA)

1. Wstęp

Wpływ wstępnych odkształceń plastyczności na własności mechaniczne metali oraz na zachowanie się powierzchni plastyczności jest zagadnieniem bardzo istotnym dla właściwego poznania i wykorzystania materiału, dlatego też problemom tym poświęcono wiele prac zarówno doświadczalnych, jak i teoretycznych. Jak wiadomo, materiał początkowo izotropowy lub prawie izotropowy zmienia swoje właściwości mechaniczne pod wpływem odkształceń plastycznych. W literaturze można znaleźć przykłady podnoszenia własności mechanicznych materiałów pracujących w warunkach osiowego rozciągania przez nadanie wstępnych wydłużeń trwałych, np. [1, 2]. Znane są również prace, w których analizowano wpływ wstępny odkształceń plastycznych na nośność elementów zginanych, wytrzymałość zmęczeniową i inne własności materiału, np. [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Celem przedstawionej pracy jest doświadczalna analiza wpływu wstępnych wydłużeń trwałych, powstających niezależnie od procesów fabrycznego kształtowania elementu, na zależność $R_k - \lambda$ (naprężenie krytyczne — smukłość) dla wybranej stali konstrukcyjnej R35. Pierwsze prace dotyczące tego zagadnienia przeprowadzone przez P. Jastrzębskiego [9] oraz prace własne [10, 11] wykazały złożoność badanego problemu. Z jednej strony istotny wpływ ma tu zjawisko Bauschingera, a z drugiej naturalna niejednorodność oraz niedoskonałości geometryczne materiału i ich ujawnianie się w procesie wydłużania. Rozwiązanie tych problemów można znaleźć tylko na podstawie badań doświadczalnych; taki też charakter ma przedstawiona praca.

Podstawową część pracy poprzedzono obszernymi badaniami zjawiska Bauschingera dla wybranej do dalszych badań stali R35. Było to konieczne dla właściwego ustalenia programu badań zasadniczych, szczególnie, iż w świetle dotychczasowych doświadczeń istnieją poważne rozbieżności poglądów zarówno co do zakresu, jak i charakteru tego zjawiska; np. [12, 13, 14, 15]. Ponadto większość dotychczasowych prac nie dotyczyła materiałów technicznych. Nieliczne badania przeprowadzone dla takich właśnie materiałów wykazały bardzo zróżnicowany charakter tego zjawiska. Należy również zauważyć, że w pracach tych określano na ogół tylko zmiany granicy plastyczności, natomiast brak w nich informacji co do wpływu wstępnych odkształceń trwałych na wartość granicy proporcjonalności oraz przebieg zależności $\sigma - \varepsilon$ (szczególnie początkowego odcinka zakresu sprężysto-plastycznego). Cechy te, jak wiadomo, mają podstawowy wpływ na wartość naprężeń krytycznych przy wyoboczeniu.

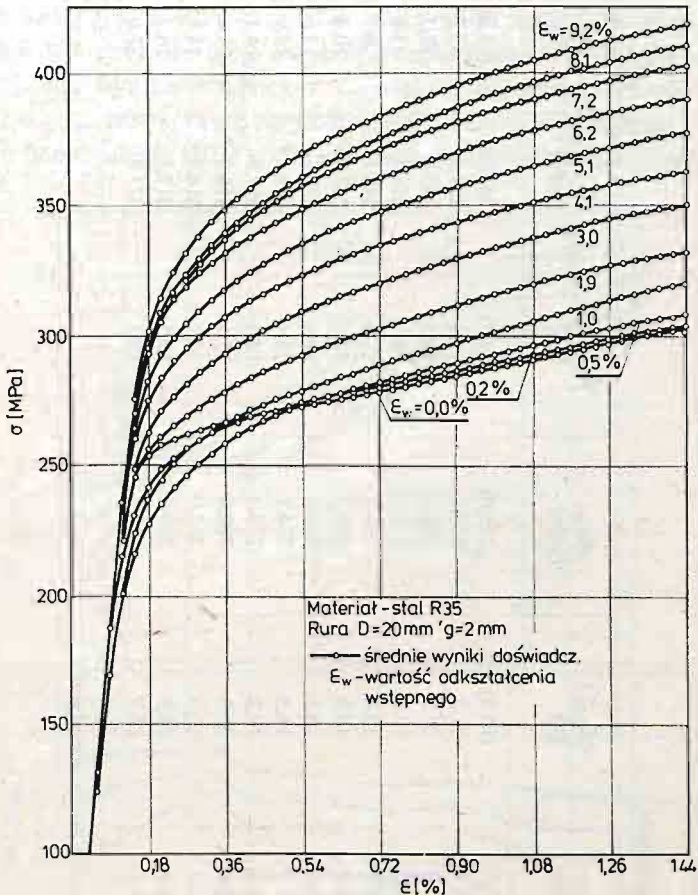
2. Badania zjawiska Bauschingera

2.1. Zakres i metodyka badań. Jak wiadomo, zjawisko Bauschingera występuje dla różnych przypadków obciążenia wstępnego i wtórnego. Ze względu jednak na kierunek badań zasadniczych, badania zjawiska Bauschingera ograniczono tylko do przypadku jednoosiowego stanu naprężenia, przy drodze obciążenia rozciąganie-ściskanie. Do badań użyto rur o średnicy zewnętrznej $D = 20$ mm i grubości ścianki $g = 2$ mm. Próbkę pobrano z pięciu losowo wybranych z partii prętów o długości około 4 m. W skład każdej serii wchodziło pięć próbek o długości 300 mm, przy czym każda z nich pochodziła z innego pręta. Poszczególnym seriom próbek nadawano odpowiednie wydłużenia wstępne o następujących wartościach: $\bar{\epsilon}_w = 0, 0,2, 0,5, 1, 2, 3 \dots 9\%$. Wydłużenia kontrolowano zarówno w trakcie procesu wydłużania, jak i po odciążeniu. W tym celu każda próbka była odpowiednio skalowana, co umożliwiało dokładne pomiary wydłużeń trwałych wzdłuż ich długości, jak również ustalenie rozkładu tych wydłużeń na odcinku próbki przeznaczonym do dalszych badań. Próbkę do prób ściskania o długości $l = 5D = 100$ mm wycinano z uprzednio rozciąganych odcinków o długości 300 mm. Przyjęcie takich wymiarów próbki pozwalało na uzyskanie jednorodnego stanu naprężenia w jej części środkowej, gdzie dokonywano pomiaru odkształceń, przy jednoczesnym uniknięciu wyboczenia próbki w badanym zakresie obciążeń. Podobną metodykę przeprowadzenia badań dla stopów aluminium zastosował autor w pracy [12].

Przeprowadzone doświadczenia pozwoliły na określenie wpływu wstępnych wydłużeń trwałych na przebieg zależności $\sigma - \epsilon$ przy ściskaniu oraz na wartości umownych granic plastyczności $R_{\epsilon_{p1}}$, zdefiniowanych różnymi wartościami odkształcenia plastycznego $\epsilon_{p1} = 0,02, 0,05, 0,1, 0,2\%$. Przyjęcie takich wartości ϵ_{p1} pozwoliło określić zmiany najbardziej istotnych z punktu widzenia inżynierskiego charakterystyk mechanicznych. Wartości $R_{0,02}$ i $R_{0,05}$ przyjmowane są na ogół jako umowne granice sprężystości oraz wartości $R_{0,1}$ i $R_{0,2}$ przyjmowane są jako umowne granice plastyczności materiału. Porównano również zależności $\sigma - \epsilon$ przy ściskaniu i rozciąganiu. Wyniki doświadczeń poddano analizie statystycznej korzystając z rozkładu t-Studenta. Przyjęto poziom ufności $p = 0,975$. Wszystkie obliczenia wykonano przy użyciu EMC, wykorzystując przygotowany przez autora program, pozwalający na kompleksowe opracowanie wyników prób ściskania lub rozciągania.

2.2. Analiza wyników badań. Zgodnie z normowymi własnościami mechanicznymi stal R35 powinna mieć wyraźną granicę plastyczności. W trakcie doświadczeń okazało się jednak, że wytypowane do badań pręty cechy tej nie miały. O ile w próbie rozciągania wyraźna granica plastyczności w niektórych wypadkach dawała się zaobserwować, o tyle w próbie ściskania zjawiska tego nie obserwowano. Średnie krzywe doświadczalne $\sigma_k - \epsilon_k$ otrzymane przy rozciąganiu i ściskaniu były kształtem bardzo zbliżone do siebie, chociaż zaobserwowano wyraźnie wcześniejsze pojawienie się odkształceń plastycznych przy ściskaniu. Stąd też otrzymano przy ściskaniu mniejsze wartości analizowanych granic $R_{\epsilon_{p1}}$ (por. tabl. 1). Nie stwierdzono istotnych różnic w szerokości pasm ufności dla obu wykresów. Średnie zależności $\sigma_k - \epsilon_k$ wyznaczono na podstawie doświadczalnych zależności $\sigma_{iJ} - \epsilon_{iJ}$, obliczając drogą interpolacji liniowej wartości σ_{ik} odpowiadające ustalonym wartościom $\epsilon_k = k\Delta\epsilon$, a następnie obliczając wartości σ_k jako średnią artmetyczną

z n wartości σ_{ik} . Obliczanie naprężeń σ_{ik} drogą interpolacji liniowej znacznie upraszcza i przyspiesza obliczenia w porównaniu z metodą interpolacji krzywoliniowej. Przy założeniu dostatecznie dużego zagęszczenia punktów doświadczalnych sposób ten daje dobrą dokładność i jest najczęściej stosowany. W obliczeniach przyjęto wartość $\Delta\varepsilon = 0,0003$. Na rys. 1 porównano średnie zależności $\sigma_k - \varepsilon_k$ otrzymane dla poszczególnych serii ściskanych próbek. Jak widać z rysunku, wszystkie krzywe $\sigma_k - \varepsilon_k$ dla serii próbek



Rys. 1

wydłużanych wstępnie charakteryzują się znacznie mniejszą krzywizną początkowego odcinka zakresu sprężysto plastycznego, przy czym krzywe dla serii wydłużanych wstępnie do wartości $\bar{\varepsilon}_w = 0,2 \div 1\%$ leżą w znacznej części poniżej krzywej dla materiału nieodkształconego. Daje się również zauważyć bardzo wyraźne obniżenie granicy proporcjonalności, które w wypadku serii $\bar{\varepsilon}_w = 0,5\%$ wynosi około 25%. Przy dalszym wzroście wydłużeń wstępnych następuje wzmocnienie materiału i stopniowe podwyższanie się granicy proporcjonalności. W tabelicy 1 zestawiono wartości umownych granic plastyczności $R_{\varepsilon_{p1}}$ dla $\varepsilon_{p1} = 0,02, 0,05, 0,1, 0,2\%$ wraz ze współczynnikami zmienności $\nu(R_{\varepsilon_{p1}})$ dla poszczególnych serii. Maksymalne obniżenie umownej granicy plastyczności ($R_{\varepsilon_{p1}}$) niezależnie

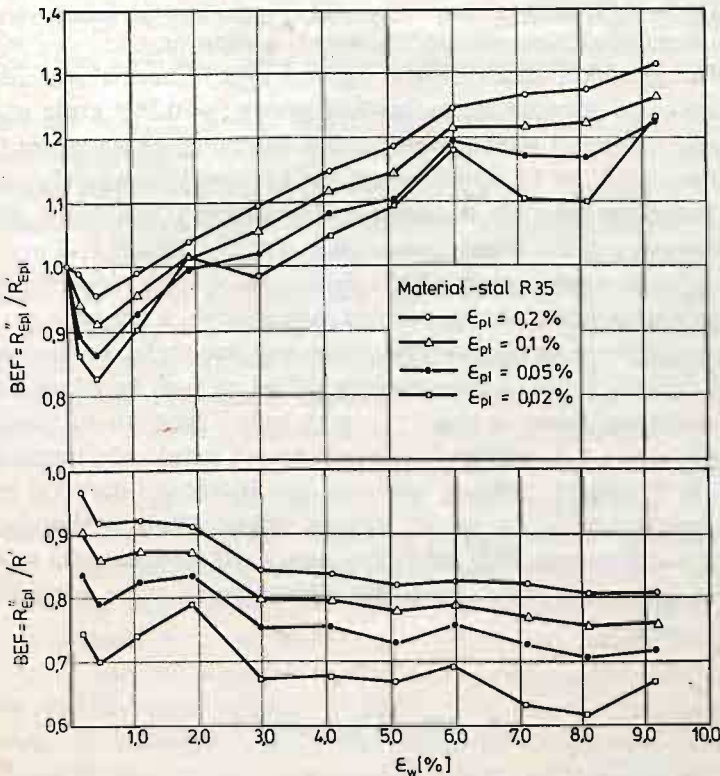
Tablica 1. Zestawienie wyników prób ściskania

Odkształtowanie wstępne ε_w [%]	$R_{0,02}$ [MPa]	$\nu(R_{0,02})$ [%]	$R_{0,05}$ [MPa]	$\nu(R_{0,05})$ [%]	$R_{0,1}$ [MPa]	$\nu(R_{0,1})$ [%]	$R_{0,2}$ [MPa]	$\nu(R_{0,2})$ [%]
0	(260.1)	(15.3)	(265.0)	(14.7)	(267.9)	(13.3)	(271.7)	(12.6)
0.19	234.4	21.2	253.2	16.8	259.4	15.2	265.0	13.5
0.48	201.9	27.5	226.7	22.5	245.0	18.3	262.1	15.2
1.09	193.5	14.9	218.2	15.0	236.4	13.6	253.4	13.1
1.93	211.7	12.4	234.4	10.8	248.5	9.7	262.1	9.6
3.01	238.4	14.9	252.2	12.4	262.9	10.4	275.1	9.2
4.10	230.6	18.8	258.2	15.4	273.8	13.6	289.6	12.1
5.11	245.7	16.3	274.1	14.4	289.3	12.9	304.3	11.8
6.01	256.5	19.2	279.4	16.5	297.3	14.1	314.6	12.6
7.15	277.0	22.3	302.4	17.1	314.9	15.4	330.1	13.7
8.13	259.2	15.5	297.0	14.6	314.8	14.6	336.0	12.5
9.23	258.1	24.9	296.0	19.1	317.1	16.2	337.8	13.8
	289.1	22.2	310.8	19.1	327.8	17.0	348.8	14.5

Liczby podane w nawiasach dotyczą próby rozciągania

od wartości odkształcenia trwałego (ϵ_{pl}), jakie przyjmujemy do kryterium płynięcia, występuje przy odkształceniach wstępnych $\bar{\epsilon}_w = 0,5\%$. Przy większych wydłużeniach wstępnych następuje monotoniczny wzrost tych wartości. Można również zauważyć, że począwszy od pewnej wartości wydłużenia wstępnego wartość granicy plastyczności jest większa od granicy plastyczności dla materiału pierwotnego; tak więc wzmocnienie materiału następuje przy obciążeniu przeciwnym do wstępnego.

Przeprowadzone doświadczenia ujawniły bardzo dużą niejednorodność własności mechanicznych badanej stali R35. Średnie współczynniki zmienności $\nu(\sigma_k)$ dla poszczególnych serii próbek wynosiły ok. 10%, a współczynniki zmienności $\nu(R_{\epsilon_{pl}})$ wahały się w granicach 10 - 20%. Jak wynika z tablicy 1, największą dyspersję wykazała granica $R_{0,02}$, stąd też dla $\epsilon_{pl} = 0,02$ zaznacza się znaczna nieregularność w przebiegu zależności współczynnika efektu Bauschingera (BEF) od wartości wstępnych wydłużeń trwałych (por. rys. 2).



Rys. 2

Przyczyn tego należy upatrywać zarówno w niejednorodności materiału, jak i w zmienionej w tym wypadku, względnej dokładności pomiaru. Należy podkreślić, że przeprowadzone w ostatnich latach badania statystyczne [16] cech mechanicznych rur ze stali R35 wykazały również bardzo duże rozrzuty tych cech. Przykładowo, obliczony na podstawie ok. 400 prób współczynnik zmienności granicy plastyczności dla rur o małych średnicach i o grubości ścianki 1 ÷ 3 mm, a więc podobnych do rur użytych w opisywanych badaniach, wyniósł 13,1%.

Ze względu na fakt, że zjawisko Bauschingera bywa różnie interpretowane (por. np. [12, 13]), na rys. 2 przedstawiono wyniki badań przy przyjęciu dwóch najczęściej stosowanych kryteriów oceny efektu Bauschingera. Jako kryterium ilościowej oceny tego zjawiska przyjęto współczynnik efektu Bauschingera (BEF — Bauschinger effect factor) zdefiniowany następującymi zależnościami

$$\text{BEF}(\varepsilon_{p1}) = \frac{R'_{\varepsilon_{p1}}}{R'_{\varepsilon_{p1}}} \quad (2.1)$$

$$\text{BEF}(\varepsilon_{p1}) = \frac{R'_{s_{p1}}}{R'} \quad (2.2)$$

gdzie:

$R'_{\varepsilon_{p1}}$ — umowna granica plastyczności materiału pierwotnego,

$R'_{\varepsilon_{p1}}$ — umowna granica plastyczności przy obciążeniu o zwrocie przeciwnym do obciążenia wstępnego,

R' — maksymalne naprężenie przy obciążeniu wstępnym.

Przyjmując definicję efektu Bauschingera wg wzoru (2.1) można stwierdzić, że w badanej stali zjawisko to ujawnia się najbardziej przy $\varepsilon_w = 0,5\%$, a dla ε_w rzędu $2 \div 3\%$ zanika. Obliczając natomiast współczynnik efektu Bauschingera wg wzoru (2.2) widać, że począwszy od wartości $\varepsilon_w = 3\%$ współczynnik ten jest mniej więcej stały i zależy tylko od wartości ε_{p1} . Otrzymane rezultaty wykazują pod względem jakościowym dobrą zgodność z wynikami otrzymanymi dla stopów aluminium PA7N i PA4N [12].

Z rys. 2 wynika, że współczynnik efektu Bauschingera (BEF) jest tym mniejszy (efekt większy), im mniejsza jest wartość ε_{p1} przyjęta jako kryterium umownej granicy plastyczności. Jest to niezależne od przyjęcia definicji tego współczynnika. Istotna różnica wynikająca z przyjętej definicji zjawiska Bauschingera polega na tym, że wg wzoru (2.1) istnieje dla badanego materiału pewna wartość ε_w , przy której zjawisko to zanika, przy czym zanikanie następuje przy tym większych odkształceniach wstępnych, im mniejszą przyjmie się wartość ε_{p1} do kryterium płynięcia (por. rys. 2a). Biorąc zaś definicję wg wzoru (2.2), efekt Bauschingera występuje dla każdej wartości odkształcenia wstępnego, z tym że od pewnej wartości współczynnik BEF jest stały i zależy tylko od wartości ε_{p1} (por. rys. 2b). W dalszej części pracy pod pojęciem efektu Bauschingera autor rozumie to zjawisko zgodnie z definicją 2.1.

3. Badania stateczności

3.1. Zakres i metodyka badań. Badania stateczności przeprowadzono dla rur o średnicy zewnętrznej $D = 20$ mm i dwóch różnych grubościach ścianek $g = 1$ mm oraz $g = 2$ mm. Wartości wydłużeń wstępnych, które nadawano poszczególnym seriom próbek (por. tabl. 2), ustalono na podstawie analizy wyników badań zjawiska Bauschingera. Kierowano się z jednej strony dążeniem do ustalenia wpływu zjawiska Bauschingera ujawniającego się bardzo wyraźnie przy małych odkształceniach wstępnych na nośność pręta osiowo ściskanego, co może mieć w pewnych wypadkach istotny wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji. Z drugiej zaś strony badania miały wyjaśnić, czy nadanie odpowiednio dużego wydłużenia wstępnego, przy którym nie ujawnia się zjawisko Bauschingera, pozwoli uzyskać podwyż-

Tablica 2. Badania stateczności — zakres i liczebność serii

Rodzaj pręta	Założone wartości wydłużenia wstępnego $\varepsilon_w(\%)$	Liczba serii	Liczebność serii	Liczba próbek	Liczba próbek kontrolnych*
$g = 1\text{mm}$	0	10	8	80	12(12)
	4	10	8	80	16
$g = 2\text{mm}$	0	10	8	80	12(12)
	0,5	10	8	80	16
	4	10	8	80	16
Ogółem:				400	72(24)

*) Próbki przeznaczone do statycznej próby ściskania i rozciągania. Liczba próbek odpowiada liczbie prętów z których pobrano próbki danej serii.

W nawiasach podano liczbę próbek przeznaczonych do statycznej próby rozciągania.

szczenie naprężeń krytycznych, a więc oddziaływać korzystnie na pręt narażony na niebezpieczeństwo wyboczenia.

Doświadczenia przeprowadzono w przedziale smukłości $10 \div 105$, a więc praktycznie obejmowały cały zakres wyboczenia niesprężystego, w którym można było spodziewać się istotnego wpływu wstępnego wydłużenia na wartość naprężeń krytycznych. Program badań obejmował 400 prób stateczności oraz znaczną liczbę doświadczeń o charakterze podstawowym w celu określenia własności mechanicznych oraz doświadczalnej zależności $\sigma_k - \varepsilon_k$ dla danej partii materiałów (por. tabl. 2). Doświadczenia przeprowadzono przy założeniu schematu pręta obustronnie utwierdzonego, stosując specjalnie zaprojektowane uchwyty. Naprężenia krytyczne (nośność pręta), zgodnie z powszechnie przyjętym poglądem, obliczano jako wartość stosunku największej siły uzyskanej w doświadczeniu do pola przekroju poprzecznego pręta. Wydłużenia wstępne nadawano oddzielnie każdej próbce o określonej smukłości. Taka metodyka przygotowania materiału wymagała co prawda znacznego nakładu pracy, ale zapewniała uzyskanie próbek znacznie bardziej jednorodnych pod względem wartości wydłużenia wstępnego niż w wypadku przeciągania całych prętów o długości $4 \div 5$ m następnie wycinania odpowiednich próbek, jak to miało miejsce np. w pracy [9]. Kontrolę wydłużeń prowadzono podobnie jak w przypadku badań zjawiska Bauschingera zarówno w trakcie procesu wydłużania, jak i po odciążeniu. W zależności od długości próbki nanoszono od 1 do 3 baz pomiarowych o długości 10 cm. Pomiaru długości baz dokonywano za pomocą mikroskopu warsztatowego z dokładności do 0,01 mm. Ze względu na zagadnienie starzenia materiału starano się zachować stały dla wszystkich serii próbek przedział czasu wynoszący ok. 15 dni pomiędzy procesem przeciągania a próbami stateczności.

Wszystkie wyniki doświadczalne poddano opracowaniu statystycznemu. Przyjęto założenie, że zarówno własności mechaniczne materiału, jak i naprężenia krytyczne podlegają rozkładowi normalnemu. Warto zwrócić uwagę, że badania przeprowadzone przez Europejski Konwent Konstrukcji Metalowych (C.E.C.M.) [17] w celu doświadczalnej weryfikacji hipotezy, że rozkład naprężeń krytycznych jest normalny, nie potwierdziły w pełni tego założenia. Mimo to Konwent zarówno w ramach komisji konstrukcji stalo-

wych, jak i aluminiowych przyjął taki rozkład do analizy wyników badań stateczności [17, 18, 19]. Ze względu na niewielką liczebność poszczególnych prób ($n = 8 \div 12$) korzystano podobnie jak w wypadku badań zjawiska Bauschingera z rozkładu t-Studenta. Przyjęto poziom ufności $p = 0,975$ zalecany przez C.E.C.M. [18, 19].

3.2. Analiza wyników badań. Przebieg i wyniki doświadczeń wykazały, że zastosowane uchwyty zapewniały we wszystkich wypadkach te same warunki przyłożenia siły oraz dobrze realizowały założony schemat pręta obustronnie całkowicie utwierdzonego. Przeprowadzone pomiary geometrii prętów oraz początkowych krzywizn ich osi geometrycznych wykazały, że wszelkiego typu odchylenia wymiarów od wartości nominalnych mieszczą się w granicach przewidzianych dość tolerancyjną normą [20]. Również podstawowe własności mechaniczne obu rodzajów prętów określone na podstawie prób rozciągania (tabl. 3) spełniają wymagania normy [21]. Pozwala to stwierdzić, że wszystkie wytypowane do badań pręty reprezentowały materiał konstrukcyjny spełniający wymagania stawiane dla danego gatunku i wyrobu.

Tablica 3. Średnie własności mechaniczne przy rozciąganiu

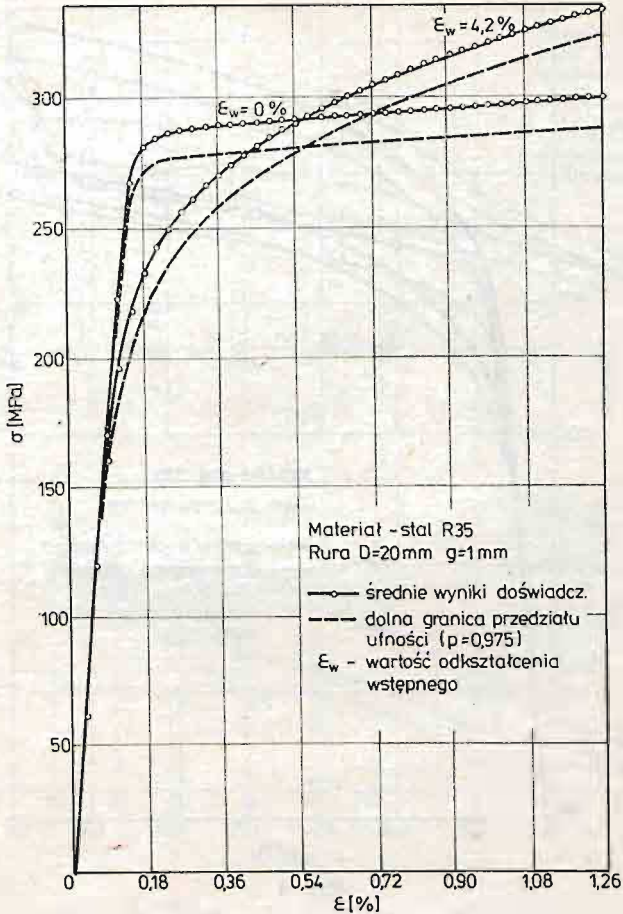
Rodzaj pręta	Liczba próbek	R_r [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	a_5 [%]
$g = 1 \text{ mm}$	12	410,8	280,3	33,9
$g = 2 \text{ mm}$	12	409,4	273,1	30,7

Rzeczywiste smukłości poszczególnych próbek zarówno wydłużanych, jak i niewydłużanych wstępnie były dla wszystkich serii bardzo bliskie wartościom założonym. W tablicy 4 na podstawie wyników prób ściskania próbek kontrolnych podano dla poszczególnych serii teoretyczne wartości smukłości granicznych. Należy zaznaczyć, że wartości granic proporcjonalności R_H obliczano na podstawie średnich wartości $R_{0,02}$ i $R_{0,05}$ drogą ekstrapolacji liniowej. Jak widać z tablicy, doświadczenia obejmowały cały obszar wybożenia niesprężystego.

Tablica 4. Smukłości graniczne przy wybożeniu gętnym

Rodzaj pręta	ε_w [%]	R_H [MPa]	λ_{gr}
$g = 1 \text{ mm}$	0	262,1	84,3
	4,2	186,8	99,0
$g = 2 \text{ mm}$	0	238,2	93,4
	0,5	185,3	105,8
	4,1	236,5	93,7

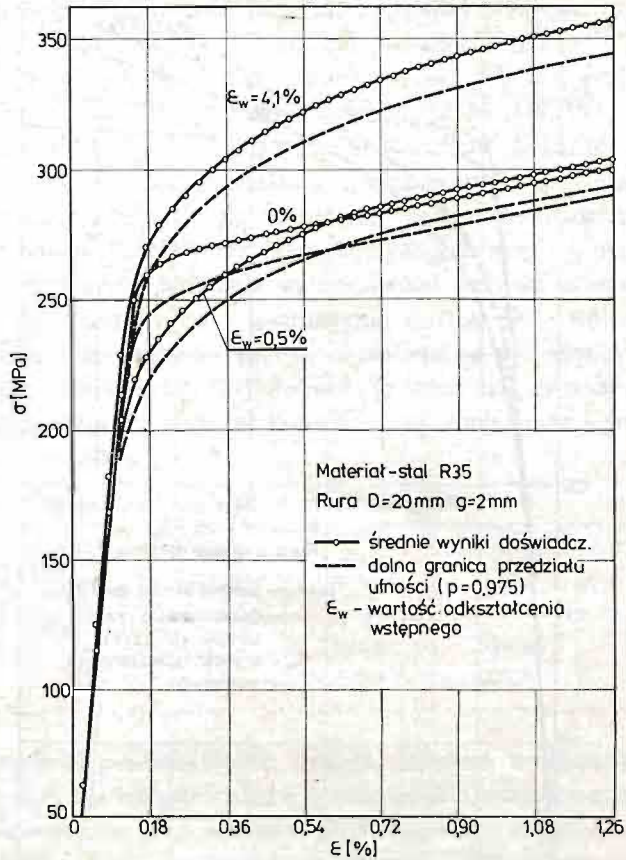
Wyniki prób ściskania uzyskane dla próbek kontrolnych o grubości ścianki $g = 1 \text{ mm}$ i $g = 2 \text{ mm}$ (rys. 3 i rys. 4) wykazują istotne różnice własności mechanicznych obu partii materiałów, przy czym dotyczy to zarówno materiału pierwotnego, jak i wydłużonego wstępnie. Różnice ujawniały się także w trakcie procesu nadawania wydłużeń; zaobserwo-



Rys. 3

wano mniejszą zdolność do wydłużeń równomiernych prętów o $g = 1$ mm, czego efektem były w niektórych wypadkach znaczne różnice wydłużeń trwałych (ϵ_w) na poszczególnych odcinkach pomiarowych próbki. Należy jednak pamiętać o tym, że wydłużenie trwałe pręta jest bardzo czułe na wszelkie formy niejednorodności typu geometrycznego i strukturalnego. Nawet najmniejsza niejednorodność, pozostająca niemal bez wpływu na inne własności mechaniczne materiału, powoduje znaczne zmiany wartości wydłużenia trwałego. Zagadnienie to szczegółowo analizował Marciniak [22, 23].

Przebieg zależności $\sigma_k - \epsilon_k$ dla próbek o $g = 1$ mm i $\epsilon_w = 0\%$ ma charakter zbliżony jak dla materiału idealnie sprężysto-plastycznego, a krzywa dla materiału wydłużonego ($\epsilon_w = 4,2\%$) leży w znacznej części poniżej krzywej pierwotnej (rys. 3). Obserwuje się więc, mimo znacznej wartości wydłużenia wstępnego, bardzo wyraźny wpływ efektu Bauschingera (przykładowo wartość R_H obniża się o ok. 29%, por. tabl. 4). W wypadku prętów o grubszej ściance ($g = 2$ mm) charakter krzywych $\sigma_k - \epsilon_k$ jest taki, jakiego należało oczekiwać na podstawie wyników badań zjawiska Bauschingera dla danej stali. Krzywa dla materiału wydłużonego wstępnie do 0,5% leży prawie całkowicie poniżej

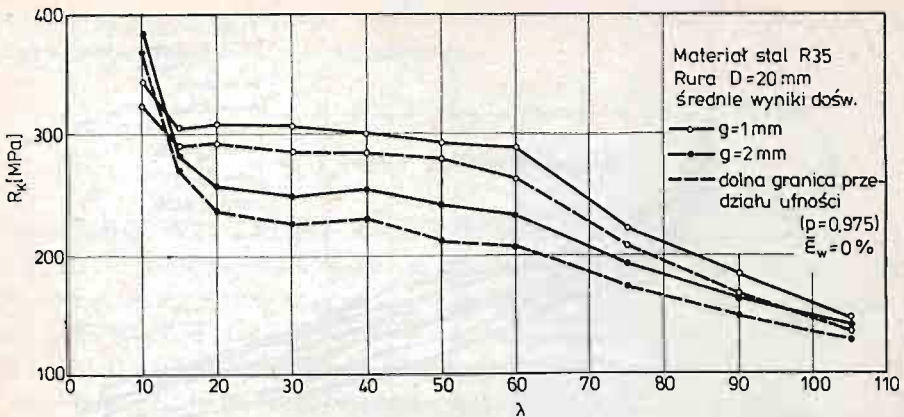


Rys. 4

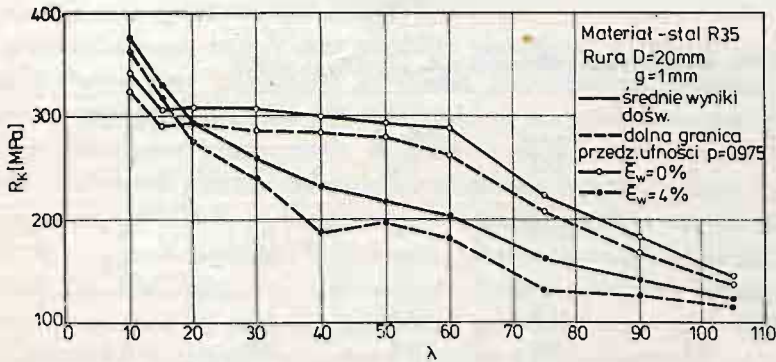
krzywej dla materiału nieodkształconego, a wartość granicy proporcjonalności obniża się o ok. 23%. Natomiast krzywa dla materiału odkształconego wstępnie do wartości $\epsilon_w = 4,1\%$ leży w całym zakresie powyżej krzywej dla materiału pierwotnego, a więc następuje tu wzmocnienie materiału.

Porównanie średnich krzywych $R_k - \lambda$ otrzymanych dla obu rodzajów prętów nieodkształconych wstępnie pokazano na rys. 5. Obie krzywe wykazują podobieństwo kształtu przy $\lambda = 15 \div 105$, obserwuje się jednak istotne różnice ilościowe, co jest zgodne z charakterem zależności $\sigma_k - \epsilon_k$ dla obu partii materiału. Warto tu zwrócić uwagę na to, że podstawowe własności mechaniczne (normowe) — $R_r, R_{0,2}, a_5$, są w obu wypadkach bardzo zbliżone (por. tabl. 3).

Wpływ wydłużenia wstępnego na zależność $R_k - \lambda$ (rys. 6) w wypadku prętów o $g = 1$ mm jest wyraźnie niekorzystny w całym badanym zakresie smukłości (max. obniżenie wartości R_k przy $\lambda = 60$ wynosi ok. 30%), tylko dla małych smukłości $\lambda = 10 \div 15$ następuje niewielkie podwyższenie naprężeń krytycznych. Obserwuje się także zmianę charakteru wykresu $R_k - \lambda$, oraz większą dyspersję wyników (współczynniki zmienności $v(R_k)$ dla serii $\bar{\epsilon}_w = 0$ wahały się w granicach 4,5 ÷ 9,1%, a dla $\bar{\epsilon}_w = 4\%$ w granicach 3,6 ÷ 19,3%). W wypadku prętów o grubszej ścianie ($g = 2$ mm) występuje dla serii $\bar{\epsilon}_w =$



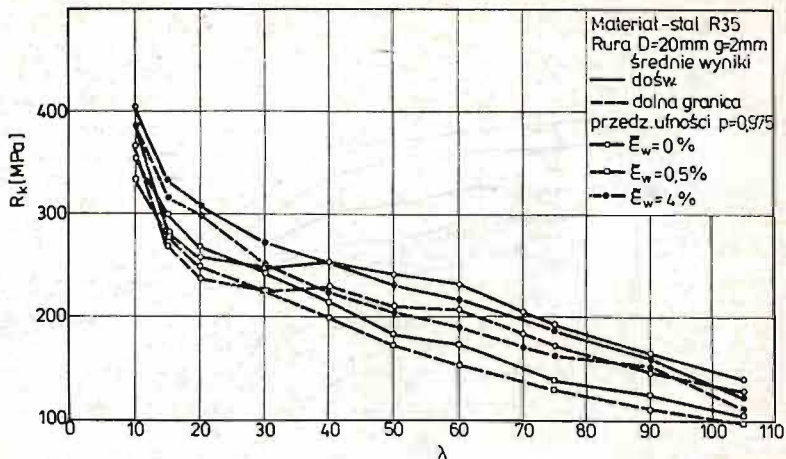
Rys. 5



Rys. 6

= 4% podwyższenie naprężeń krytycznych w zakresie smukłości $\lambda = 10 \div 30$ o ok. $5 \div 20\%$, a dla większych smukłości różnice między obu krzywymi są bardzo nieznaczne i biorąc pod uwagę szerokość przedziałów ufności — można je uznać za nieistotne (por. rys. 7). Daje się natomiast zauważyć bardzo istotne obniżenie naprężeń krytycznych prawie w całym badanym zakresie smukłości dla serii $\bar{\epsilon}_w = 0,5\%$, a maksymalny spadek wartości R_k wynosi ok. 30% przy $\lambda = 105$. Tak więc widać w tym wypadku bardzo wyraźne skutki występowania efektu Bauschingera. W tabelicy 5 zestawiono średnie współczynniki zmienności $\nu(R_k)$ obliczone dla wszystkich badanych serii. Podano również średnie współczynniki $\nu(R_k)$ z uwzględnieniem podziału smukłości na dwie grupy oraz współczynniki $\nu(R_{0,02})$ i $\nu(R_{0,2})$. Należy zwrócić uwagę, że dla wszystkich serii próbek o grubszej ścianie nie obserwuje się istotnych różnic w dyspersji wyników, co świadczy o tym, że wydłużenie wstępne nie spowodowało zwiększenia niejednorodności materiału. Natomiast w wypadku prętów cieńszych następuje wyraźne zwiększenie współczynników zmienności dla materiału wydłużonego, a zatem wzrost jego niejednorodności.

Trudno jest autorytatywnie odpowiedzieć na pytanie, gdzie leży przyczyna, że dla poszczególnych partii tego samego materiału obserwuje się różną ich zdolność do odkształceń równomiernych oraz zdecydowanie odmienny wpływ wstępnego wydłużenia. Napewno



Rys. 7

Tablica 5. Średnie współczynniki zmienności $\nu(R_{0.02})$, $\nu(R_{0.2})$, $\nu(R_k)$

Rodzaj pręta	ϵ_w [%]	$\nu(R_{0.02})$ [%]	$\nu(R_{0.2})$ [%]	$\nu(R_k)$ [%]		
				$\lambda = 10 \div 105$	$\lambda = 10 \div 50$	$\lambda = 60 \div 105$
$g = 1 \text{ mm}$	0	12.7	4.6	6.2	5.3	7.6
	4.2	13.7	7.3	8.6	8.2	11.4
$g = 2 \text{ mm}$	0	11.9	6.6	8.6	7.9	9.7
	0.5	10.8	6.8	8.0	7.0	9.1
	4.1	11.9	7.8	8.2	7.0	9.9

jednym z czynników, który może mieć istotny wpływ na zdolność materiału do wydłużeń równomiernych jest grubość ścianki próbki (ogólnie — pole przekroju). Im mniejszy jest bowiem przekrój próbki, tym większe procentowo różnice powierzchni przekroju na długości próbki przy tej samej klasie dokładności jej wykonania (niejednorodność geometryczna) [22]. Tym między innymi można tłumaczyć negatywny wpływ wydłużeń wstępnych na zależność $R_k - \lambda$ dla badanych prętów o grubości ścianki $g = 1 \text{ mm}$. Czynnikiem mającym wpływ na to zagadnienie jest także długość próbki. Przy dłuższych próbkach większe jest bowiem prawdopodobieństwo wystąpienia niekorzystnych czynników niż w próbkach krótkich. Tym można tłumaczyć brak wzrostu wartości R_k przy większych smukłościach dla prętów o grubości ścianki $g = 2 \text{ mm}$, mimo iż należało tego oczekiwać na podstawie przebiegu zależności $\sigma_k - \epsilon_k$. Doświadczenia potwierdzają wpływ wymienionych czynników; jednak niejednorodność technicznego, a nie wyidealizowanego materiału ma charakter bardzo złożony i poza wymienionymi, są inne czynniki, których wpływ nie jest z góry znany. Oczywiście istotny wpływ mogą mieć odmienne warunki produkcji obu materiałów. Dokładne wyjaśnienie tych problemów wymagałoby przeprowadzenia specjalnych badań wraz z badaniami strukturalnymi oraz uwzględnienia procesów technologicznych i reologicznych. Problemy te oczywiście wykraczały poza ramy

niniejszej pracy, której celem była analiza zachodzących zjawisk i ich wpływ na konkretne zagadnienie inżynierskie — wyboczenie.

4. Uwagi i wnioski końcowe

Przeprowadzone doświadczenia potwierdziły wniosek wysunięty w pracy [12], że ujawnianie się efektu Bauschingera w materiałach technicznych może mieć odmienny charakter nie tylko dla poszczególnych materiałów, lecz istotne różnice mogą występować nawet w ramach jednego stopu. Istotnym czynnikiem mającym wpływ na to zjawisko jest jednorodność materiału i jego zdolność do równomiernych odkształceń plastycznych. W wypadku materiału niejednorodnego, zjawisko Bauschingera nie ma tendencji do zanikania wraz ze wzrostem wydłużenia, czego przyczyną jest zwiększająca się równocześnie niejednorodność materiału. Prowadzi to w konsekwencji do obniżenia jego własności mechanicznych i naprężeń krytycznych (por. rys. 3 i rys. 6).

Wyniki przedstawionych badań oraz rezultaty otrzymane w innych pracach [9, 10] wykazały, że podstawowym warunkiem uzyskania podwyższenia naprężeń krytycznych przez nadanie wstępnego wydłużenia jest jednorodność materiału oraz jego zdolność do równomiernych odkształceń plastycznych. W takim wypadku wartość wydłużenia wstępnego musi być odpowiednio duża, aby zniwelować ujemny wpływ zjawiska Bauschingera.

Bardzo istotnym wnioskiem z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji jest zauważone znaczne obniżenie naprężeń krytycznych prętów poddanych niewielkim wydłużeniom ($\bar{\epsilon}_w = 0,5\%$). Przyczyną tego jest zjawisko Bauschingera. Ma to szczególne znaczenie ze względu na fakt, że maksymalny spadek wartości R_k (ok. $20 \div 30\%$) występuje dla często stosowanych w praktyce smukłości, a odkształcenia plastyczne tego rzędu mogą powstać w konstrukcji na przykład przy przypadkowym przeciążeniu. Również w elementach projektowanych z uwzględnieniem sprężystoplastycznych właściwości materiału, czy to metodą stanów granicznych czy też metodą przyrostową co w ostatnich latach zaczyna być powszechnie stosowane — przedstawione problemy mogą mieć istotne znaczenie i wpływać korzystnie lub niekorzystnie na bezpieczeństwo konstrukcji.

Przeprowadzone doświadczenia wykazały również, że celowe jest prowadzenie badań na materiałach technicznych i wyrobach stosowanych w konstrukcjach, gdyż ich rzeczywiste własności mogą często znacznie odbiegać od własności założonych.

Literatura cytowana w tekście

1. M. KOSIOREK, L. SŁOWAŃSKI: *O wpływie wstępnego przeciążenia na podstawowe charakterystyki mechaniczne drutu i lin do konstrukcji sprężonych*. Inż. i Bud., nr 1, s. 28 - 30, 1973.
2. E. DRESCHEROWA: *Wpływ wstępnego odkształcenia plastycznego na energię udarowego zrywania*. Mech. Teor. i Stos., 1, 5, 1967, s. 103 - 111.
3. Z. DYLAĞ, Z. ORŁOŚ: *Badanie wpływu wstępnych odkształceń trwałych na wytrzymałość zmęczeniową pewnej stali niskowęglowej*. Biul. WAT, nr 9/1960, s. 53 - 71.
4. J. KUBISSA, M. STRZELCZYK: *Twardość i udarność stali wstępnie trwale wydłużonej*. Inż. i Bud. nr 4 1979, s. 148 - 149.

5. J. KUBISSA: *Nośność zginanych elementów ze stali wstępnie trwale wydłużonej*. Inż. i Bud. nr 8 - 9, s. 174 - 177, 1982.
6. Z. MARCINIAK: *Badanie wpływu wstępnych odkształceń plastycznych na przebieg wzmocnienia metali metodą rozciągania niejednorodnych próbek*. Prace IPPT PAN, nr 45, 1971.
7. W. SZCZEPIŃSKI: *On the Effect of Plastic Deformation on Yield Condition*. Arch. Mech. Stos., 15, 2, 1963.
8. W. SZCZEPIŃSKI, J. MIASTKOWSKI: *An Experimental Study of the Effect of the Prestraining History on the Yield Surfaces of an Aluminium Alloy*. J. Mech. Phys. Solids, vol. 16, 1968.
9. P. JASTRZĘBSKI: *Influence des allongemens initiaux permanents sur le flambement de barres métalliques dans la zone des petits elancements*. Arch. Inż. Łąd. nr 1, s. 259 - 268, 1980.
10. J. GRABOWSKI: *Wyboczenie prętów metalowych poddanych wstępnym wydłużeniem trwałym*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1978.
11. J. GRABOWSKI: *Wpływ wstępnego wydłużenia plastycznego na nośność krytyczną ściskanych prętów ze stopów aluminium*. Inż. i Bud. nr 11 - 12, s. 345 - 348, 1981.
12. J. GRABOWSKI: *The Bauschinger effect in structural aluminium alloys*. Rozpr. Inż. 31, 3, 1983.
13. J. MIASTKOWSKI: *Kryteria plastycznego płynięcia i hipotezy wzmocnienia metali w świetle badań doświadczalnych*. Prace IPPT PAN, nr 41, 1973.
14. J. NEMEC, *Wytrzymałość i sztywność części stalowych*. WNT, Warszawa 1968.
15. N. N. MALININ, J. RZYSKO: *Mechanika Materiałów*. PWN, Warszawa 1981.
16. W. WŁODARCZYK: *Statystyczna ocena wytrzymałości obliczeniowych rur stalowych*. Arch. Inż. Łąd, nr 4, s. 667 - 675, 1981.
17. J. JACQUET: *Essais de flambement et exploitation statistique*. Construction Metallique, nr 3, 1970.
18. A. BERNARD, F. FREY, J. JAUSS, Ch. MASSONNET: *Recherches sur le comportement au flambement de barres en aluminium*. Mémoires de L'A.I.P.C., vol. 33 - I, Zurich 1973.
19. A. BERNARD, Ch. MASSONNET: *Comparaison d'essais de flambement français avec la simulation sur ordinateur*. Mémoires de L'A.I.P.C., vol. 33 - I, Zurich 1973.
20. PN - 73/H - 7420 — *Rury stalowe bez szwu walcowane lub ciągnione na zimno. Wymagania i badania*.
21. PN - 75/H - 84024 — *Stal do wyrobu rur. Gatunki*.
22. Z. MARCINIAK: *Wydłużenie równomierne próbek o kilku szczególnych rodzajach niejednorodności*. Arch. Hut., 3, 11, s. 273 - 285, 1966.
23. Z. MARCINIAK: *Odkształcenia graniczne przy tłoczeniu blach*. WNT, Warszawa 1971.

Резюме

ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПОДВЕРГНУТЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СТОЙКИМ УДЛИННЕНИЯМ

Работа содержит экспериментальный анализ влияния пластических деформаций на потерю устойчивости стальных стержней. Исследования были проведены на стержнях кольцевого сечения, выполненных из малоуглеродистой стали R 35. Эксперименты проводились в пластической области потери устойчивости ($10 \leq \lambda \leq 105$).

Основной частью работы предшествовали обширные исследования эффекта Баушингера. Результаты исследований были проанализированы с учетом двух разных подходов.

Исследования потери устойчивости позволили сделать вывод, что небольшие предварительные растяжения ($\epsilon_w \approx 0,5\%$) ведут к заметному понижению критических напряжений. Это происходит из-за существенных, с точки зрения инженерной практики, величин гибкости. В случае введения больших деформаций эффект Баушингера исчезает, и в некоторых случаях это ведёт к повышению критических напряжений.

Summary

BUCKLING OF STEEL BARS INITIALLY OVERSTRAINED IN TENSION

This work is an experimental analysis of the influence of initial overstrain in tension on buckling strength of steel bars. Circular tubes of carbon steel (R35) were used for that purpose. The investigation was done for the inelastic stress range ($10 \leq \lambda \leq 105$).

The basic part of this work was preceded by extensive tests for the Bauschinger effect. The results of the tests were shown according to two different approaches concerning the definition of the Bauschinger effect.

The experiments of stability have shown that small initial overstrain ($\epsilon_w = 0.5\%$) make flexural buckling strength decreased within the range of slenderness, which is important from the technical point of view. In case of considerable initial overstrain the Bauschinger effect disappears and in some cases an increase in buckling strength may occur.

Praca została złożona w Redakcji dnia 6 stycznia 1984 roku