ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1973

Seria: HUTNICTWO z. 3 Nr kol. 370

Zygmunt Rafalski, Leszek Godecki

Politechnika Śląska
Wydział Metalurgiczny

WYSTĘPOWANIE WYRAŹNEJ GRANICY PLASTYCZNOŚCI NA WALCÓWCE PRZEZNACZONEJ DO WYROBU ŚRUB PRZERÓBKĄ PLASTYCZNĄ NA ZIMNO

Streszczenie. W artykule podano zarys występowania wyraźnej granicy plastyczności w stalach i przytoczono wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań występowania wyraźnej granicy plastyczności w stalach przeznaczonych do wyrobu śrub przeróbką plastyczną na zimno.

1. Wstęp

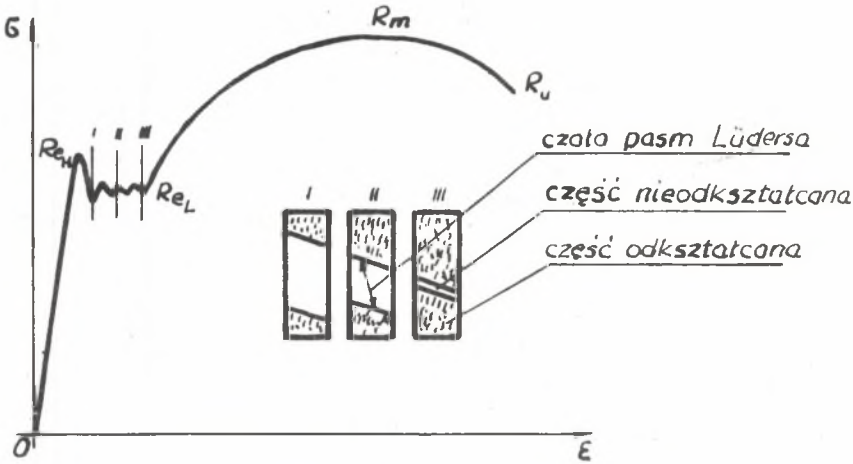
Współczesne dynamiczne tempo rozwoju techniki i przemysłu, a głównie motoryzacyjnego, stawia przed przemysłem śrubiarskim daleko idące zaostrzone wymagania i kryteria wytrzymałościowe dotyczące elementów połączeń śrubowych.

Międzynarodowe zalecenia ISO R 898 "Mechanical properties of fasteners. Bolts, Screws and Studs", jak również zalecenia RWPG PC 306-67 "Bołty i winty. Techniczieskije usłowija postawki. Mechaniczieskije swojstwa" i PC 307-65 - "Mietody ispytanij miechaniczieskich swojstw", przewidują między innymi w klasie własności mechanicznych śrub 3.6-6.8 określanie wyraźnej granicy plastyczności Re na gotowych śrubach. W oparciu o powyższe zalecenia opracowano nową normę PN-70/M-82054 "Śruby, wkręty i nakrętki stalowe ogólnego przeznaczenia. Ogólne wymagania i badania" dotyczącą śrub produkowanych w Polsce.

Przeprowadzona przez autorów seria badań pilotowych wykazała, że wyraźna granica plastyczności na gotowych śrubach nie występuje, wobec czego przeanalizowano niektóre czynniki wpływające na jej występowanie.

2. Występowanie wyraźnej granicy plastyczności

Przy rozciąganiu mono- lub polikrystalicznej próbki metalu o sieci regularnej przestrzennie centrycznej, zawierającej niewielkie ilości dodatków, na krzywej rozciągania (rys. 1) zauważa się górną i dolną granicę plastyczności. Ten charakterystyczny przebieg krzywej rozciągania obserwuje się również dla niektórych niedostatecznie czystych metali o innej strukturze krystalicznej.



Rys. 1. Wykres rozciągania stali miękkiej

W rozciąganej próbce, z chwilą osiągnięcia górnej granicy plastyczności, na jednostkę pola przekroju poprzecznego działa obciążenie równe Re_H. Przy dalszym zwiększaniu obciążenia występuje niestabilność naprężenia. W pewnych niewielkich obszarach próbki naprężenie zmniejsza się do wartości równej dolnej granicy plastyczności Re_L. Wówczas zachodzi plastyczne odkształcenie, które jest zaczątkiem powstawania pasm Lüdersa. Do czasu zakończenia rozprzestrzeniania się pasm próbka wydłuża się bez zmiany obciążenia (rys. 1). Warunkiem powstania pasm Lüdersa jest istnienie wyraźnej granicy plastyczności.

Oparty na teorii dyslokacji mechanizm występowania wyraźnej granicy plastyczności podany przez Cotrella i rozwinięty przez Johntsona i Gil-

mana, Hahna i innych dla próbek polikrystalicznych można by ująć następująco:

Wyraźna granica plastyczności występuje zwykle w efekcie silnego zwiększenia liczby swobodnych dyslokacji na początku plastycznego płynięcia. W stanie wyjściowym brak takich dyslokacji może wynikać albo z doskonałości kryształu, albo z utwierdzenia istniejących dyslokacji domieszkami obcych atomów. Warunkiem zaistnienia skoku naprężenia na górnej granicy plastyczności jest albo zupełny początkowy brak swobodnych dyslokacji, albo obecność tylko niewielkiej ich ilości. Generowanie i rozmnażanie swobodnych dyslokacji rozpoczyna się w zasadzie w miejscach koncentracji naprężeń i kontynuowana jest w pasmach Ludersa, rozprzestrzenianie których w krysztale zachodzi zwykle drogą poślizgów poprzecznych. Jeżeli w stanie wyjściowym mamy do czynienia z utwierdzeniem dyslokacji, granica plastyczności występuje w efekcie wyrwania dyslokacji z atmosfer atomów domieszek przy słabym jej blokowaniu lub drogą wytwarzania nowych w miejscach koncentracji naprężeń w przypadku silnego blokowania.

Granice ziarn hamują rozprzestrzenianie się plastycznego płynięcia do tej pory, dopóki nie zostanie osiągnięte naprężenie określone wzorem Petcha.

$$R_{e_L} = R_{e_{L(mon)}} + K \cdot \sqrt{d},$$

gdzie

R_{e_L} - dolna granica plastyczności

$R_{e_{L(mon)}}$ - dolna granica plastyczności monokryształu (wielkość tarcia wewnętrznego)

K - stała, wyrażająca opór zablokowanych dyslokacji

d - średnia średnica ziarna.

Przy naprężeniu tym koncentracja naprężeń na końcach pasma wywołuje płynięcie w sąsiednim ziarnie albo w wyniku wyrwania dyslokacji przy słabym jej blokowaniu, albo w efekcie wytwarzania nowych dyslokacji na granicach między ziarnami lub w sąsiedztwie z nimi.

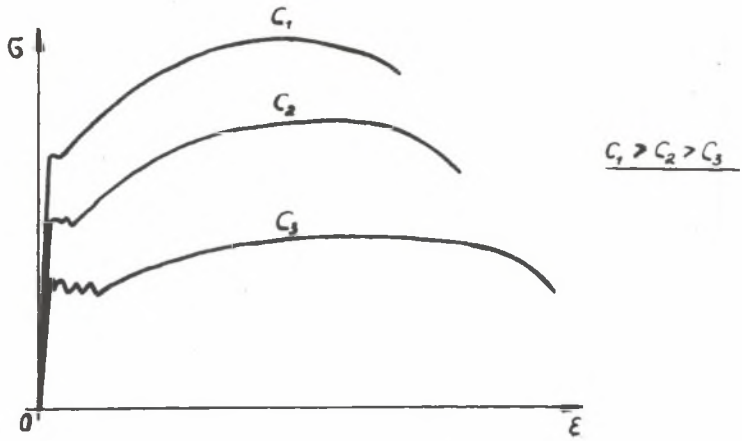
Do czynników warunkujących wystąpienie wyraźnej granicy plastyczności należy zaliczyć między innymi:

a) zawartość składników międzywęzłowych (w stali - węgla i azotu w roztworze stałym - ferrytu)
b) wielkość ziarna
c) zgniot powierzchniowy
d) efekt starzenia
e) temperatura badania
f) prędkość odkształcenia.

3. Wpływ zawartości węgla na granicę plastyczności żelaza i stali niskowęglowej

Wyraźna granica plastyczności charakteryzuje praktycznie wszystkie stale handlowe niskowęglowe w stanie gorącowalcowanym lub wyżarzonym, niezależnie od tego czy stal jest uspokojona, półuspokojona, czy nieuspokojona. W stalach tych dyslokacje są utwierdzone przez atmosfery atomów węgla i azotu występujące w roztworze stałym ferrytu. Utwierdzenie takie ma miejsce po ochłodzeniu z temperatury gorącego walcowania lub po wyżarzaniu.

W żelazie α wyraźna granica plastyczności występuje najwyraźniej przy stosunkowo niewielkiej zawartości węgla (10^{-7} do 10^{-4}%). Przy większej zawartości węgla w stalach granica plastyczności staje się mniej ostra i może zniknąć zupełnie (rys. 2). Zanikanie wyraźnej granicy plastyczności spowodowane jest przez przeszkody takie jak cementyt lub inne węgliki utrudniające ruch dyslokacji, który w takich przypadkach może odbywać się dopiero pod działaniem naprężenia przewyższającego naprężenia potrzebne do oderwania dyslokacji od atmosfery lub na przezwyciężenie przeszkody. Zawartość węgla w stali w decydujący sposób wpływa na długość odcinka płynięcia przy naprężeniu dolnej granicy plastyczności. Te pierwiastki, które zmniejszają zawartość węgla lub azotu względnie obu w roztworze ferrytu, działają w kierunku zmniejszenia przystanku na granicy plastyczności. Wynika to stąd, że widocznie dyslokacje w stalach nie zawierających węgla lub wzoru w roztworze nie są



Rys. 2. Wykres rozciągania stali o różnej zawartości węgla C

utwierdzone i mogą poruszać się przy stosunkowo mniejszych naprężeniach. Chociaż w miarę wzrostu naprężenia w efekcie umocnienia gęstość dyslokacji rośnie, lawina dyslokacji charakteryzująca wyraźną granicę plastyczności nie pojawi się, a co za tym idzie nie ujawni się wyraźna granica plastyczności.

Wielkość ziarna wywiera istotny wpływ zarówno na wartość naprężenia odpowiadającego wyraźnej granicy plastyczności, jak i na długość odcinka płynięcia.

Przy bardzo drobnym ziarnie płynięcie na granicy plastyczności może osiągnąć 9%. Dla materiału gruboziarnistego odcinek płynięcia jest mały, a powyżej pewnej wielkości ziarna zupełnie go brak. Stale niskowęglowe handlowe mają zwykle długość płynięcia równą 3-6%.

4. Gatunki stali stosowane do produkcji śrub przeróbką plastyczną na zimno

Analizie poddano gatunki stali według dostępnych norm zagranicznych i krajowych w aspekcie wymagań własności mechanicznych w szczególności zaś występowania wyraźnej granicy plastyczności R_e. Norma BN-64/0644-03 "Walcówka do wyrobu śrub i nakrętek spęczaniem na zimno" przewiduje następujące gatunki stali do wyrobu śrub przeróbką plastyczną na zimno odpowiadające klasie własności mechanicznych 3.6-6.8.

St 2A o R_e = 216 N/mm^2 (22 kG/mm^2)
St 3A o R_e = 235 N/mm^2 (24 kG/mm^2)
St 4AA o R_e = 294 N/mm^2 (30 kG/mm^2)
35 YA o R_e = 314 N/mm^2 (32 kG/mm^2).

Pierwsze trzy gatunki są przeznaczone do wyrobu śrub w klasach własności mechanicznych 3.6-4.6, przy czym gatunki St2A i St3A są gatunkami podstawowymi. Stal 35YA jest przeznaczona do produkcji śrub o wyższych klasach wytrzymałościowych.

5. Występowanie wyraźnej granicy plastyczności na walcówce

5.1. Schemat pobierania prób

Istniejący stan procesu technologicznego produkcji śrub narzucił program badań i obserwacji. Zdając sobie sprawę z tego, że dostarczone materiały hutnicze do wyrobu śrub wykazują dość dużą niejednorodność własności mechanicznych należało zaproponować taką metodę pobierania prób, aby otrzymane wyniki były jak najbardziej miarodajne i zbliżone do stanu rzeczywistego.

Próbki walcówki pobierano losowo ze składu dwóch największych polskich zakładów produkujących śruby. Wybrano dwie drogi pobierania prób losowych.

a) dla każdego dostępnego asortymentu w wyżej wymienionych gatunkach po 3 próbki z jednego kręgu z obu jego krańców,

b) dla każdego dostępnego asortymentu w wyżej wymienionych gatunkach po 3 próbki biorąc po 1 próbie z kręgu.

Pobrany asortyment obejmował zakres średnic od Ø 55 do Ø 20 w gatunkach St2A, St3A, St4AA i 35YA, przy czym pobrano następujące asortymenty w gatunkach:

St2A - Ø 5,5 Ø 7,5 Ø 8,5 Ø 9,5 Ø 10,5 Ø 11,5
Ø 12,4 Ø 13,5 Ø 16,5 Ø 18,5 Ø 20
razem 33 próby,

St3A - Ø 5,5 Ø 6,5 Ø 7,5 Ø 9,5 Ø 10,5 Ø 11,5 Ø 12,5 Ø 13,5
Ø 18,5 Ø 20
razem 30 prób

35YA - Ø 7,5 Ø 8,5 Ø 9,5 Ø 10,5 Ø 11,5 Ø 12,5 Ø 13,5 Ø 14,5
Ø 18,5
razem 27 prób

St4AA - Ø 10,5 Ø 11,5 Ø 12,5 Ø 13,5 Ø 16,5 Ø 18,5
razem 18 prób

Ogółem pobrano 108 prób.

Wymienione asortymenty pochodziły z różnych wytopów, przy czym skład wszystkich gatunków stali mieścił się w granicach przewidzianych normami.

Tablica 1

Własności walcówki w stanie surowym i wyżarzonym

Gatunek stali	Stan surowy			Stan żarzony		
	R_m / N/mm^2	$R_e(R_{0.2})$ / N/mm^2	R_e/R_m	R_m / N/mm^2	$R_e(R_{0.2})$ / N/mm^2	R_e/R_m
St2A	285	236	0,61	-	-	-
St3A	446	271	0,61	442	324	0,74
35YA	452	270	0,60	536	370	0,69
St4AA	534	309	0,58	-	-	-

W tablicy 2 przeprowadzono obliczenie średniej arytmetycznej i odchylenia średniego granicy plastyczności R_e dla walcówki, przykładowo w gat. St2A i St3A w stanie surowym.

Otrzymane charakterystyczne miejsca krzywej rozciągania (rys. 3) odpowiadające granicy plastyczności autorzy sklasyfikowali jako:

1) wyraźny przystanek
2) nieznaczny przystanek
3) załamanie
4) umowny przystanek

według następującego kryterium (rys. 3).

Tablica 2

Średnia arytmetyczna i odchylenie średnie granicy plastyczności R_e

R_e N/mm^2	Gat. St2A x = 235			
x_i	n_i	t	$t \cdot n_i$	$t^2 \cdot n_i$
195	2	-2	-4	8
215	8	-1	-8	8
235	7	0	0	0
255	5	+1	+5	5
275	2	+2	+4	8
295	-	+3	0	0
315	3	+4	+12	48
$\sum$	27		+9	77

Średnia arytmetyczna

$$R_e = x + \frac{\sum(t \cdot n_i)}{\sum n_i} \cdot 1$$

$$R_e = 235 + \frac{9}{27} \cdot 20 = 241{,}7$$

Odchylenie średnie

$$S = 1\sqrt{\frac{\sum(t^2 \cdot n_i)}{\sum n_i} - \left[\frac{\sum(t \cdot n_i)}{\sum n_i}\right]^2}$$

$$= 20\sqrt{\frac{77}{27} - \left(\frac{+9}{27}\right)^2} = 28{,}0$$

R_e N/mm^2	Gat. St3A x = 275			
x_i	n_i	t	$t \cdot n_i$	$t^2 \cdot n_i$
215	3	-3	-9	27
235	3	-2	-6	12
255	6	-1	-6	6
275	5	0	0	0
295	2	+1	2	2
315	1	+2	2	4
235	1	+3	3	9
$\sum$	21		-14	60

Średnia arytmetyczna

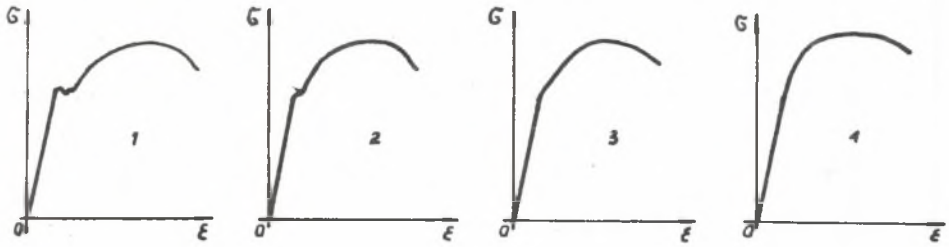
$$R_e = x + \frac{\sum(t \cdot n_i)}{\sum n_i} \cdot 1$$

$$= 275 + \frac{-14}{21} \cdot 20 = 261{,}7$$

Odchylenie średnie

$$S = 1\sqrt{\frac{\sum(t^2 \cdot n_i)}{\sum n_i} - \left[\frac{\sum(t \cdot n_i)}{\sum n_i}\right]^2}$$

$$= 20\sqrt{\frac{60}{21} - \left(\frac{-14}{21}\right)^2} = 31{,}1$$



Rys. 3. Charakter krzywych rozciągania walcówki surowej

1. Wyraźny przystanek - istnieje wyraźna górna i dolna granica plastyczności.
2. Przystanek nieznaczny - na krzywej obserwuje się przyrost odkształcenia ε bez wzrostu naprężenia σ.
3. Załamanie - istnieje punkt na krzywej, gdzie obserwuje się wyraźną zmianę kąta nachylenia krzywej.
4. Umowny przystanek - krzywa ma charakterystyczne łukowe przejście.

Udział procentowy poszczególnych rodzajów krzywych rozciągania w ogólnej ich sumie dla danego gatunku zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Udział poszczególnych rodzajów krzywych rozciągania w %

Lp.		Stan surowy				Stan żarzony	
		St2A	St3A	St4AA	35YA	St3A	35YA
		%	%	%	%	%	%
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Wyraźny przystanek	14,8	14,3	-	8,7	100	100
2	Nieznaczny przystanek	33,4	14,3	7,1	14,4	-	-
3	Załamanie	33,4	47,6	28,6	34,8	-	-

cd. tablicy 3

1	2	3	4	5	6	7	8
4	Symptomy wyraźnej granicy plastyczności	81,6	76,2	35,7	60,9	100	100
5	Umowny przystanek	18,4	23,8	64,3	39,1	-	-
6	R a z e m	100	100	100	100	100	100

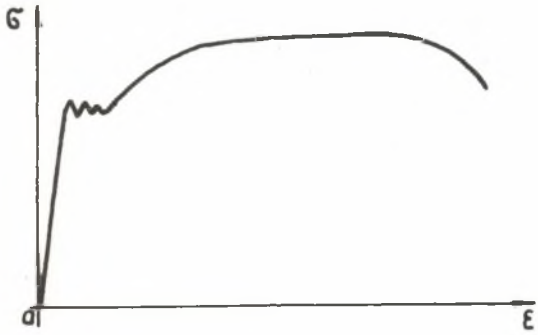
Pierwsze trzy przypadki zaliczono do symptomów wyraźnej granicy plastyczności, choć należy zaznaczyć, że ocena nieznacznego przystanku czy załamania może mieć charakter subiektywny. Dlatego też tablicę 3 należy traktować jako informacyjną.

5.3. Analiza wyników

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że dostarczana przez hutnictwo walcówka w gatunku St2A, St3A, St4AA i 35YA generalnie rzecz ujmując górnej i dolnej granicy plastyczności nie posiada. Można jedynie dopatrywać się istnienia granicy plastyczności, zresztą bardzo minimalnej (i problematycznej), jeżeli istniejące na krzywych rozciągania załamanie lub nieznaczny przystanek zakwalifikujemy do symptomów, wyraźnej granicy plastyczności. Jednakże ocena taka jest subiektywna, a tym samym na pewno i problematyczna. Pobrane próbki z jednego wytopu i jednego kręgu walcówki wykazują dość znaczny rozrzut własności mechanicznych $R_e(R_{0,2})$ i R_m. Otrzymane krzywe rozciągania bardzo często znacznie się między sobą różnią.

W zasadzie poza gatunkiem 35YA wartości $R_e(R_{0,2})$ i R_m dostarczanego przez huty materiału mieszczą się w granicach obowiązujących norm. Dotyczy to wartości średnich. Jednakowoż należy powtórnie podkreślić, że różnice dla poszczególnych próbek pobranych z walcówki są niekiedy znaczne (tablica 2).

W gatunku St2A przeważa nieznaczny przystanek i załamanie na krzywych rozciągania, w gatunku St3A - załamanie, w gatunkach 35YA oraz St4AA również załamanie. Jednocześnie maleje wraz ze zmianą gatunków (St2A - St4AA) udział wyraźnej granicy plastyczności R_e w całkowitej ilości prób. Wyraźnej zależności między średnicą a charakterem płynięcia materiału nie stwierdzono, aczkolwiek można się doszukiwać zmniejszenia ilości symptomów R_e wraz ze wzrostem średnicy (głównie dla gatunków 35YA i St4AA).



Rys. 4. Charakter krzywej rozciągania walcówki wyżarzonej

Poddane wyżarzaniu próbki walcówki wykazały wyraźną górną i dolną granicę plastyczności (rys. 4). Opierając się na tym fakcie można stwierdzić, że proces studzenia materiału walcowanego z temperatury końca walcowania uniemożliwia wystąpienie wyraźnej granicy plastyczności R_e wymaganej w normie BN-64/0644-03.

6. Wnioski

1. Dostarczona przez hutnictwo walcówka do wyrobu śrub obróbką plastyczną na zimno w klasie własności mechanicznych 3.6-6.8 w gatunkach St2A, St3A, 35YA i St4AA nie wykazuje istnienia wyraźnej górnej i dolnej granicy plastyczności, poza sporadycznymi przypadkami.
2. Obserwuje się nawrót wyraźnej granicy na próbkach poddanych wyżarzaniu.

LITERATURA

1. S. Katarzyński, S. Kocańda, M. Zakrzewski - Badanie własności mechanicznych metali, Warszawa 1969.
2. A.H. Cottrell - Struktura i miechaniczeskije swojstwa mietałłow, Materiały Konferencji, zorganizowanej przez National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Moskwa 1967.
3. C. Drussard - jak wyżej.
4. H. Suzuki - jak wyżej.
5. D.J. Blikwede, Metal Progress 1969, t. 95 nr 6.

ЯВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ПЛАСТИЧНОСТИ В СТАЛЯХ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ БОЛТОВ

Р е з ю м е

В статье приведён очерк появления физического предела пластичности в сталях. Приведены результаты и сделаны выводы из испытаний явлений предела пластичности в сталях для холодной штамповки болтов.

THE EXISTANCE OF MARKED PLASTIC BOUNDARY IN STEELS FOR SCREWS PRODUCTION BY MEANS OF COLD PLASTIC WORKING METHOD

S u m m a r y

In this paper the existance of marked plastic boundary in steels and also the results of investigations and conclusions concerning the existance of marked plastic boundary in steels for screws production by means of cold plastic working method have been discussed.