

Zygmunt Rafalski  
Janusz Faber

Instytut Inżynierii Materiałowej

ZMIANA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH STALI NISKOWĘGLOWYCH  
Z MIKRODODATKIEM BORU W PROCESIE CIĄNIENIA.  
WYZNACZENIE KRZYWYCH UMOCNIEŃ

**Streszczenie.** Analiza zmian własności mechanicznych stali niskowęglowych z mikrodotądkiem boru w trakcie procesu ciągnięcia. Krzywe zależności  $R_{0,2}(\epsilon)$ ,  $R_m(\epsilon)$ ,  $A_5(\epsilon)$  i  $Z(\epsilon)$ . Krzywe umocnienia ich graficzne przedstawienie oraz postać matematyczna.

## 1. Wstęp

Zwiększenie zapotrzebowania na stale konstrukcyjne, charakteryzujące się podwyższonymi własnościami mechanicznymi, przyczyniło się do podjęcia w ostatnich latach szeregu prac badawczych. W wyniku ich opracowano nowe gatunki stali konstrukcyjnych o podwyższonej wytrzymałości. Jednym z przykładów takiego kierunku jest zastosowanie stali niskowęglowej z mikrodotądkiem boru w przemyśle śrubiarskim.

## 2. Zmiana własności mechanicznych badanych stali w trakcie procesu ciągnięcia

### 2.1. Stale użyte do badań

Do badań przeprowadzonych w niniejszej pracy wykorzystano:

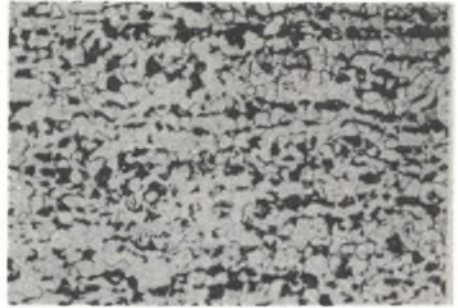
- dwa gatunki stali niskowęglowych z mikrodotądkiem boru, importowanych oznaczonych symbolami IB18 i IB20;
- cztery gatunki stali niskowęglowych z mikrodotądkiem boru, oznaczonych symbolami 3234, 3240, 3246 i 3251 pochodzących z wytopów próbnych z jednej z plaówek badawczych;
- stal niskowęglową St2A (dla porównania).

Oznaczenia i skład chemiczny badanych stali zestawiono w tablicy 1. Wybór powyższych gatunków uwzględniał obecne kierunki badań nad zastosowaniem stali z mikrodotądkiem boru do produkcji części złączonych drogą przeróbki plastycznej na zimno.

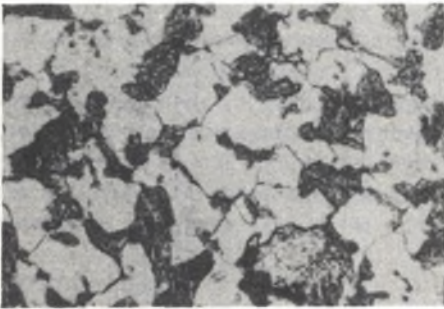
Przykładowo pokazano niektóre struktury badanych stali w stanie surowym (waloówka) na rys. 1-6.



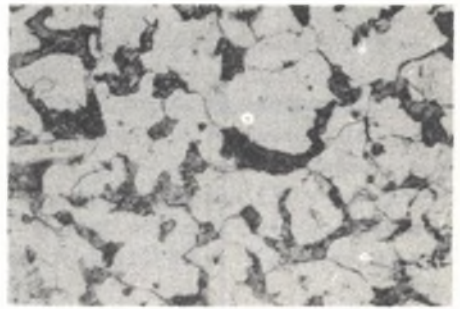
Rys. 1. Struktura stali IB18  
pow. 100x trawiono  $\text{HNO}_3$  [5]



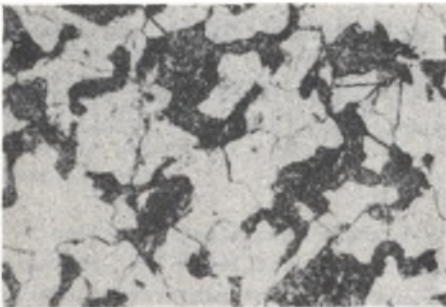
Rys. 2. Struktura stali J234  
pow. 100x trawiono  $\text{HNO}_3$  [5]



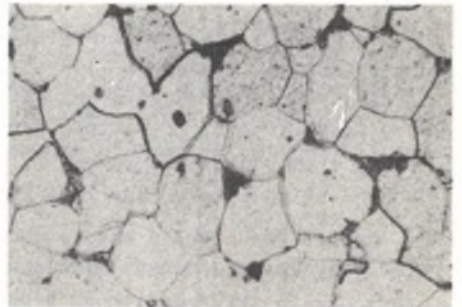
Rys. 3. Struktura stali IB20  
pow. 500x trawiono nital



Rys. 4. Struktura stali J240  
pow. 500x trawiono nital



Rys. 5. Struktura stali J251  
pow. 500x trawiono nital



Rys. 6. Struktura stali St2A  
pow. 500x trawiono nital

Tablica 1

## Oznaczenie i skład chemiczny badanych stali

Oznaczenie	C	Mn	Si	P	S	Cr	B	Al
IB18	0,19	1,16	0,34	0,017	0,027	0,26	0,0027	-
IB20	0,21	1,02	0,28	0,012	0,020	0,24	0,0037	-
3234	0,21	0,70	0,25	0,012	0,010	-	0,0024	0,034
3240	0,20	0,85	0,20	0,014	0,020	-	0,0011	0,031
3246	0,19	0,61	0,23	0,017	0,024	0,57	0,0016	0,040
3251	0,24	1,24	0,10	0,018	0,023	-	0,0020	0,040
St2A	0,11	0,35	-	0,040	0,045	-	-	-

Mikrostruktura badanych stali z mikrodotadkiem boru składa się z ferrytu i perlitu. W stanie surowym po walcowaniu perlit ułożony jest pasemkowo na podłożu ferrytycznym (rys. 1,2) [5]. Porównując rysunki 3 ÷ 5 daje się zauważyć, że stal IB20 posiada dużo więcej perlitu, niż stale 3240 i 3251; pochodzące z wytopów krajowych. Ziarna perlitu i ferrytu w stali 3251 są większe od ziarn stali IB20 i 3240. Struktura stali 3246 jest zbliżona do struktury 3251, z tym że wykazuje ona znacznie większą ilość ferrytu. Ziarna te są bardziej równoosiłowe. Struktura stali St2A (rys.6) różni się od stali z borem. Ma ona zdecydowanie mniej perlitu, a ziarna ferrytu są bardziej równoosiłowe.

## 2.2. Warunki ciągnięcia

Walcówkę w stanie surowym o średnicy  $D_0 = 12,5 \pm T$  mm z podanych gatunków stali poddano ciągnięciu, stosując sześć ciągów. Po każdym z ciągów brano z otrzymanych drutów próbki do badań wytrzymałościowych na rozciąganie.

Warunki ciągnięcia były następujące:

- ciągarka jednostopniowa typu CIP o średnicy bębna 600 mm;
- prędkość ciągnięcia,  $v = 0,87$  m/s;
- ciągadła z węglików spiekanych o kącie  $2\alpha = 14^\circ$ . Średnice części roboczej ciągadła wynosiły odpowiednio:  $D_1 = 12,2$ ;  $D_2 = 11,6$ ;  $D_3 = 10,5$ ;  $D_4 = 9,3$ ;  $D_5 = 8,0$ ; i  $D_6 = 6,7$  mm, pozostałe wymiary wg Polskich Norm;
- gnioty rzezywiste przy ciągnięciu (pojedynczo): 0,05 do 0,35 co 0,05. Uwzględniając odohyłki materiału dawało to orientacyjne gnioty sumaryczne 0,10; 0,20; 0,40; 0,65; 1,00 i 1,3.

Pomiędzy kolejnymi ciągami nie stosowano obróbki cieplnej.

### 2.3. Badanie własności wytrzymałościowych waloówki i drutu

Próby rozciągania wykonano na maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON przy prędkości  $v = 5$  mm/min. Do badań użyto próbek drutu o długości pięciokrotnej. Otrzymane wykresy krzywej rozciągania dla stali z borem charakteryzuje brak wyraźnej granicy plastyczności  $R_e$ . Dla stali St2A granica taka wystąpiła jedynie dla waloówki surowej. Z wykresów rozciągania wyznaczono  $F_m$ ,  $F_{0,2}$  oraz  $\Delta L$ , a następnie  $Z$ . W tablicy 2 zestawiono intensywność odkształceń  $\varphi_1$  uzyskanych w poszczególnych ciągach.

Tablica 2

Intensywność odkształceń  $\varphi_1$  w poszczególnych ciągach

Stal	Ciąg					
	1	2	3	4	5	6
IB18	0,047	0,156	0,343	0,576	0,895	1,251
IB20	0,049	0,154	0,348	0,581	0,884	1,254
3234	0,128	0,232	0,433	0,651	0,966	1,329
3240	0,113	0,216	0,406	0,643	0,952	1,314
3246	0,118	0,255	0,419	0,648	0,983	1,322
3251	0,122	0,225	0,419	0,648	0,961	1,322
St2A	0,101	0,232	0,417	0,643	0,947	1,312

Wartości gniotu względnego można wyznaczyć z zależności:

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{\varphi_1} \quad (1)$$

W oparciu o tablicę 2 i uzyskane wyniki badań w próbie rozciągania sporządzono wykresy zależności  $R_{0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_5$  i  $Z$  w funkcji  $\epsilon$  i  $\varphi_1$ . Wykresy te przedstawiono na rys. 7 ÷ 10.

### 2.4. Analiza otrzymanych wykresów

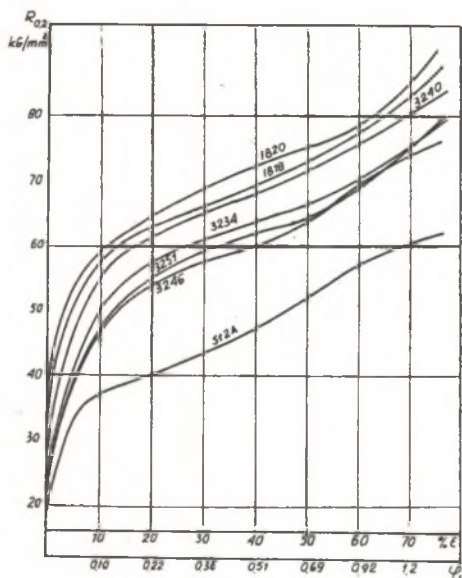
Na podstawie uzyskanych wyników badań waloówki oraz drutu ze stali z mikrodotatkami boru, po osiągnięciu ustalono oo następuje:

- stale z borem wykazują wyższe własności wytrzymałościowe w porównaniu ze stalą niskowęglową St2A, przy czym w samych stalach z borem daje wyróżnić się dwie grupy o zbliżonych własnościach, grupa I stale IB18 IB20 i 3240, grupa II stale 3234, 3246 i 3251.

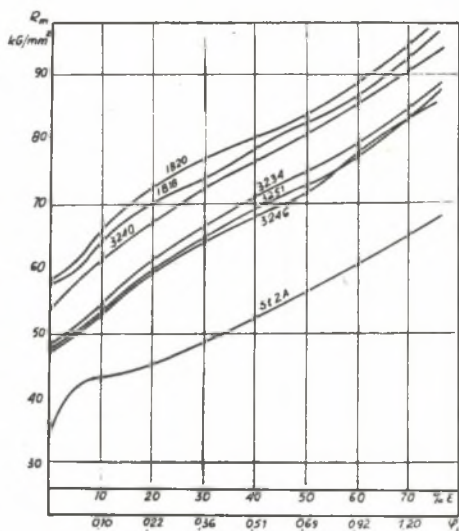
W porównaniu ze stalą St2A własności wytrzymałościowe grupy I są o około 50%, a grupy II o około 35% wyższe (patrz rys. 7 i 8);

- stale importowane przewyższają wszystkie gatunki krajowe stali, jedynie stal 3240 jest do nich zbliżona. Spośród krajowych wytopów stal ta charakteryzuje się największymi wartościami  $R_{0,2}$  i  $R_m$ ;

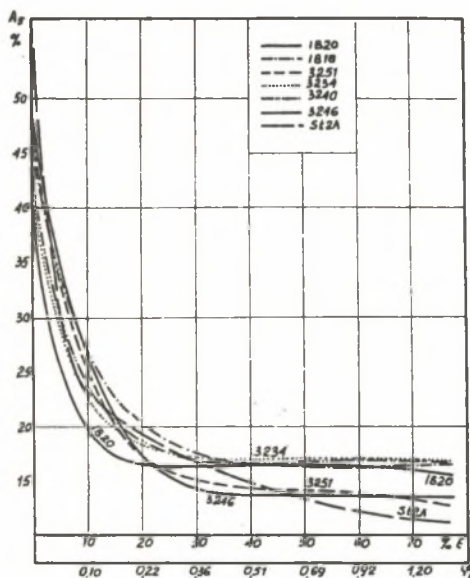




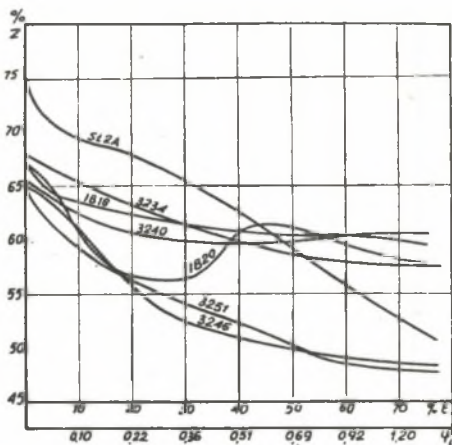
Rys. 7. Zmiana własności  $R_{0,2}$  w funkcji  $\varepsilon$  i  $\varphi_1$



Rys. 8. Zmiana własności  $R_m$  w funkcji  $\varepsilon$  i  $\varphi_1$



Rys. 9. Zmiana własności  $A_5$  w funkcji  $\varepsilon$  i  $\varphi_1$



Rys. 10. Zmiana własności  $Z$  w funkcji  $\varepsilon$  i  $\varphi_1$

- największy wzrost granicy plastyczności  $R_{0,2}$  obserwuje się dla gniotów  $\epsilon$  w zakresie do 15% ( $\varphi_1 = 0,16$ ), co potwierdza ogólne wiadomości o umocnieniu stali w procesie odgięcia (I strefa umocnienia). Dla gniotów powyżej 15% przebieg  $R_{0,2} = f(\epsilon)$  jest zbliżony do liniowego z lekką tendencją do zakrzywiania się wypukłością w dół dla gniotów  $\epsilon$  powyżej 65% ( $\varphi_1 = 1,05$ ), (patrz rys. 7);
- przebieg krzywych  $R_m = f(\epsilon)$  jest zbliżony do liniowego dla wszystkich stali z borem. Dla stali St2A daje wyróżnić się dwie fazy krzywej: pierwsza silnie rosnąca dla odkształceń  $\epsilon < 10\%$  ( $\varphi_1 < 0,1$ ), druga dla odkształceń  $\epsilon > 10\%$  (patrz rys. 8);
- zbliżone wyniki uzyskano analizując wydłużenie  $A_5$  poszczególnych gatunków (rys. 9). Dla stali z borem dla gniotów  $\epsilon > 30\%$  ( $\varphi_1 > 0,36$ ) przebieg  $A_5 = f(\epsilon)$  jest liniowy z nieznaczną tendencją do obniżania wartości  $A_5$ . Wszystkie stale w początkowym zakresie  $\epsilon < 30\%$  wykazują wyraźne zmniejszenie  $A_5$  z 45% na 17%. Przebieg  $A_5 = f(\epsilon)$  dla stali St2A jest zupełnie inny dla  $\epsilon > 30\%$ . Krzywa ta w całym zakresie gniotów jest wyraźnie malejąca. Dużym spadkiem wydłużenia cechuje się w zakresie do  $\epsilon = 20\%$  stal IB20;
- analizując krzywe  $Z = f(\epsilon)$  należy podkreślić, że dla gatunków należących do grupy I, z wyjątkiem IB20, spadek  $Z$  jest stosunkowo mały (z 65% na około 60%). Najmniejsze  $Z$  wykazują stale grupy II 3251 i 3246. Stale te wraz ze stalą St2A wykazują największe zmiany przewężenia (patrz rys. 10). Zupełnie odmienny jest przebieg zmian  $Z$  dla stali IB20. Mianowicie przy gniotach  $\epsilon = 30 \div 45\%$  następuje zwiększenie  $Z$ , przy większych gniotach przebieg zmian jest krzywą malejącą. Skład chemiczny stali IB20 jest zbliżony do pozostałych gatunków stali z borem, mimo to przebieg  $Z = f(\epsilon)$  jest diametralnie różny. Przeprowadzone powtórne badania potwierdziły ów przebieg. Wydaje się, że takich zmian  $Z$  należy doszukiwać się w strukturze stali IB20.

### 3. Wyznaczanie krzywych umocnienia

#### 3.1. Krzywa umocnienia

Pośród różnych własności materiału, ulegających zmianie pod wpływem zachodzących odkształceń trwałych, najbardziej interesujący jest związek pomiędzy naprężeniem uplastyczniającym  $\sigma_p$  a wielkością odkształcenia, powodującego przejście materiału w stan plastyczny. Związek ten najczęściej ujmowany jest w postaci tzw. krzywej umocnienia:

$$\sigma_p = f(\varphi) \quad (2)$$

gdzie:  $\varphi$  - rzeczywiste odkształcenie sprężysto-plastyczne.

Krzywe umocnienia wyznacza się na drodze doświadczalnej stosując różne sposoby odkształcenia, przy czym najczęściej stosowana jest próba jednoosiowego rozciągania. Przy jednoosiowym rozciąganiu krzywą umocnienia wyznacza się stosunkowo łatwo w zakresie wydłużenia równomiernego  $A_x$ . Dla odkształceń większych od wydłużenia równomiernego  $A_x$  wyznaczenie krzywej umocnienia wymaga określenia granicy plastyczności próbek odkształconych wstępnie np. na drodze ciągnięcia. Oprócz wymienionej metody stosuje się także jednoosiowe ściskanie lub skręcanie [1]. Przy jednoosiowym ścisaniu czynnikiem wpływającym ujemnie na dokładność tej metody jest wpływ tarcia, występujący na powierzchniach osiowych ścisanej próbki. Wpływ tego tarcia zaznacza się tym wyraźniej, im mniejszy jest stosunek wysokości próbki do jej średnicy. Istnieje wiele metod wyznaczania krzywej umocnienia za pomocą próby ściskania, eliminujących w pewnym stopniu wpływ tarcia (metoda Larke'a, Cooka, Rastiegajewa, stosowanie podkładek teflonowych itp.), niemniej metody te są pracochłonne i obciążone dość dużymi błędami. Metodą eliminującą całkowicie tarcie w procesie odkształcenia jest próba skręcania. W próbie tej skręcana próbka nie styka się na długości pomiarowej z narzędziami lub uchwytami, wskutek czego ta część próbki podlega zupełnemu swobodnemu odkształcaniu [1]. Zabiegi przeróbki plastycznej zmierzają na ogół do wywołania dużych odkształceń trwałych, stąd też do celów praktycznych bardzo często pomijamy odkształcenie sprężyste,

wykorzystując część krzywej umocnienia odpowiadającą odkształceniom plastycznym  $\varphi_p$  (rys. 11). Wartość  $\varphi_p$  wyznaczamy wówczas z następującej zależności:

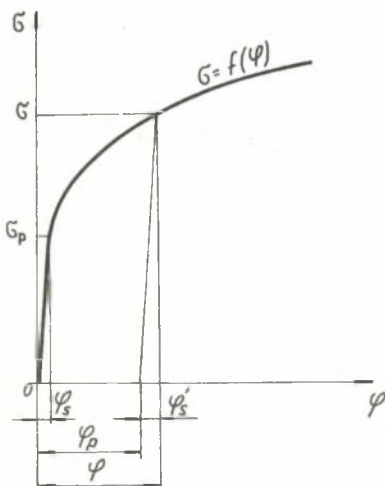
$$\varphi_p = \varphi - \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

i analizujemy związek

$$\sigma_p = f(\varphi_p) \quad (4)$$

Wyrażając odkształcenia i towarzyszące im naprężenia we współrzędnych  $\varphi_1 - \sigma_1$  możemy dla różnych schematów obciążenia otrzymywać porównalną ze sobą tzw. uogólnioną krzywą umocnienia

$$\sigma_1 = f(\varphi_1) \quad (5)$$



Rys. 11. Krzywa umocnienia

Jeżeli wartość  $\sigma_1$  w końcowym stadium procesu ciągnięcia utożsamimy z granicą plastyczności  $R_{0,2}$  otrzymanego drutu, wyznaczoną w próbie jednoosiowego rozciągania, to krzywą umocnienia można ująć zależnością

$$R_{0,2} = f(\varphi_1) \quad (6)$$

Wśród różnych metod analitycznego przedstawienia krzywej z zależności (6) dla metali wykazujących umocnienie, dwie metody zasługują na uwagę. W pierwszej z nich krzywą ciągią przedstawia się linią prostą. Równanie tej prostej zapisujemy w postaci:

$$R_{0,2} = m \cdot \varphi_1 + R_{0,2}^0 \quad (7)$$

gdzie:

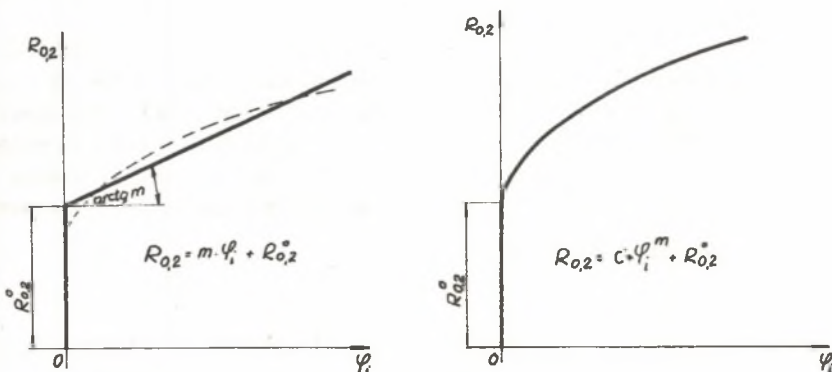
- $m$  - współczynnik kierunkowy prostej,
- $R_{0,2}^0$  - rzędna początkowa, wyznaczona wykreślnie.

W drugim przypadku stosuje się wyrażenie potęgowe

$$R_{0,2} = c \varphi_1^m + R_{0,2}^0 \quad (8)$$

gdzie:

- $m$  - współczynnik umocnienia jest zarazem potęgowym wykładnikiem krzywej umocnienia,
- $R_{0,2}^0$  - rzędna początkowa równa granicy plastyczności materiału nieodkształconego trwale (np. walcówki),
- $c$  - stała.



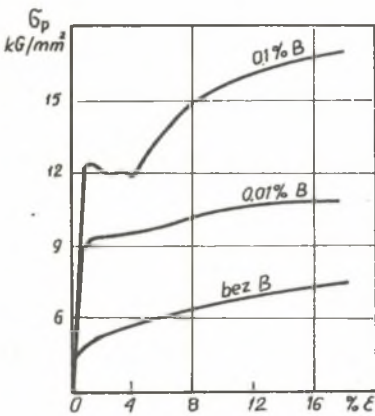
Rys. 12. Interpretacja geometryczna przybliżeń krzywych umocnienia



Przybliżenie (8) stosunkowo wiernie odtwarza krzywą umocnienia w całym zakresie odkształceń, natomiast zależność (7) niezbyt dokładnie ujmuje początkowy etap umocnienia. Wartości  $\sigma$  i  $m$  są dwiema stylowymi charakterystycznymi dla danego metalu, które wyznacza się z warunku najlepszej zgodności zależności (7) lub (8), z krzywą wyznaczoną doświadczalnie. Interpretacje obydwu przybliżeń przedstawiono na rys. 12.

### 3.2. Wpływ boru na granice plastyczności w FeC

Jak stwierdzili liczni autorzy [2, 3, 4], dodatek boru do stali wpływa na własności mechaniczne i fizyczne. Pridancoew [4] podaje, że dodatek B w zakresie do 0,1% zwiększa granicę plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie, plastyczność i ciągliwość stali. Badania prowadzone na technicznie czystym żelazie Armo0 (99,9% Fe) z dodatkiem 0,01 i 0,1% B wprowadzonego jako ferrobór wykazały, że pierwiastek ten wpływa na granicę plastyczności  $R_e$ . Wraz ze wzrostem boru w FeC (rys. 13) obszar niestabilności naprężeń na granicy płynięcia wzrasta. O ile w czystym żelazie granica plastyczności nie pojawia się, to przy zawartości 0,1% B występuje górna i dolna granica plastyczności. Wartość  $R_e$  wzrasta, co tłumaczy się zmianą struktury. Mikrostruktura wykazuje bowiem, że dodatek B wpływa na zmniejszenie wielkości ziarna, przy czym ziarna ferrytu przybierają bardziej kulistą formę [3].



Rys. 13. Wpływ boru na granicę plastyczności w FeC

### 3.3. Krzywe umocnienia dla badanych stali

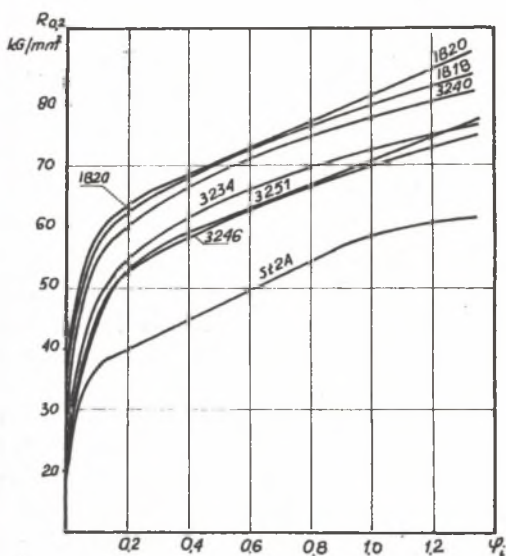
Na rys. 14 przedstawiono w układzie  $R_{0,2} - \epsilon$  krzywe umocnienia dla badanych stali. Do opisu krzywych umocnienia w zakresie krzywoliniowym wybrano zależność potęgową (8), a w zakresie prostoliniowym zależność (7). Wyznaczanie wartości  $m$  w zależności (7) nie następuje trudności. Aby wyznaczyć  $\sigma$  i  $m$  w zależności (8) przekształcono ją do postaci:

$$R_{0,2} - R_{0,2}^U = \sigma \cdot \epsilon^m \quad (9)$$

Stosując metodę przeciętych [6] do powyższej zależności otrzymano równanie liniowe

$$Y = mX + b \quad (10)$$

w którym X i Y są nowymi tzw. "wyrównanymi" zmiennymi.



Rys. 14. Wykresy krzywych umocnienia dla badanych materiałów

W naszym przypadku

$$X = \log \psi_1$$

$$Y = \log (R_{0,2} - R_{0,2}^0) \quad (11)$$

a rzędna  $b = \log o$ .

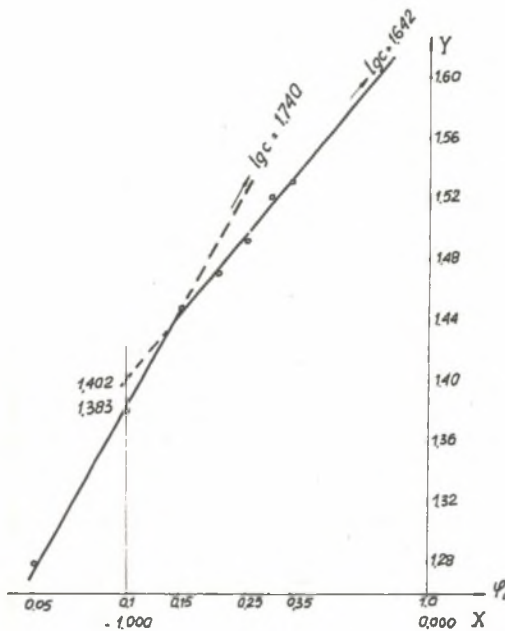
Wartość  $m$  w równaniu (10) jest współczynnikiem kątowym prostej i zarazem współczynnikiem potęgowym krzywej umocnienia. W tabelicy 3 zestawiono przykładowe obliczenia mające na celu znalezienie współczynników  $o$  i  $m$  z zależności matematycznej (8). Obliczenia te wykonano dla stali 1B20.

W oparciu o tabelicę 3 wykreślono rys. 15, z którego znaleziono wartości  $o$  i  $m$ . Wykresy zależności (10) dla pozostałych gatunków stali z B przedstawiono na rys. 16. Otrzymane postacie matematyczne krzywych umocnienia oraz wartości współczynników  $o$  i  $m$  i rzędnej początkowej  $R_{0,2}^0$  dla wszystkich stali z borem zestawiono w tabelicy 4.

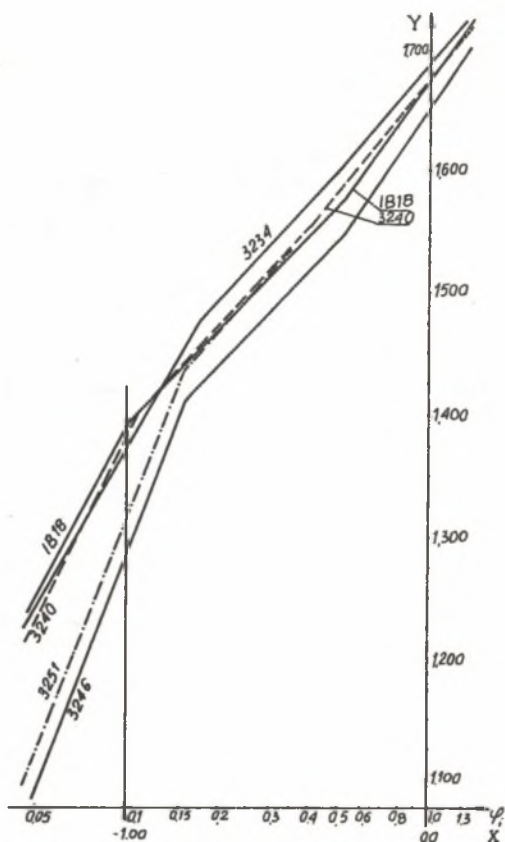
Tablica 3

Przykładowe obliczenia współczynników  $\sigma$  i  $m$ . Stal IB20

$\varphi_1$	$R_{0,2}$	Kształt	$R_{0,2}^0$	$R_{0,2}^m$ $-R_{0,2}^0$	X	Y	
0	34	Równanie (8)	34	19	-1,301	1,279	$l\sigma_0 = 1,74; \sigma = 55,0$ $m = 1,74 - 1,383 = 0,357$
0,05	53			24	-1,000	1,380	
0,10	58			28	-0,824	1,447	
0,15	62			29,5	-0,699	1,470	$l\sigma_0 = 1,642; \sigma = 43,9$ $m = 1,642 - 1,402 = 0,24$
0,20	63,5			31	-0,602	1,491	
0,25	65			33	-0,523	1,519	
0,30	67	34	-0,456	1,531			
0,35	68						
0,40	69,2	Równanie (7)	69,2	-			$m = \frac{18,3}{1,3-0,4} = 20,35$
0,50	71,3			2,1			
0,60	73,3			4,1			
0,70	75,4			6,2			
0,80	77,5			8,3			
0,90	79,5			10,3			
1,00	81,0			12,3			
1,10	83,5			14,3			
1,20	85,5			16,3			
1,30	87,5			18,3			



Rys. 15. Wykresy zależności  $R_{0,2} = f(\varphi_1)$  we współrzędnych podwójnie logarytmicznych dla stali IB20



Rys. 16. Wykresy zależności  $R_{0,2} = f(\sigma_1)$  we współrzędnych podwójnie logarytmicznych dla pozostałych stali z borem

Tablica 4

Matematyczna postać krzywej umocnienia  
oraz wartość współczynników  $\sigma$  i  $m$  i rzędnej początkowej  $R_{0,2}^0$

Stal	Zakres $\sigma_1$	$\sigma$	$m$	$R_{0,2}^0$	Zależność typu
1	2	3	4	5	6
IB18	0-0,1	72,2	0,469	33,1	$R_{0,2} = \sigma \cdot \sigma_1^m + R_{0,2}^0$
	0,1-0,52	44,9	0,263		
	0,52-1,4	47,6	0,352		
IB20	0-0,15	55	0,357	34,0	$R_{0,2} = m(\sigma_1 - 0,35) + R_{0,2}^0$
	0,15-0,35	43,9	0,240		
	0,35-1,4	-	20,35	69,2	



od. tablicy 4

1	2	3	4	5	6
3234	0-0,17 0,17-0,5 0,5-1,4	64,6 48,2 49,2	0,440 0,273 0,300	24,7	$R_{0,2} = c \cdot \varphi_1^m + R_{0,2}^0$
3240	0-0,11 0,11-0,40 0,4-1,4	77,7 45,9 47,5	0,510 0,272 0,310	30,6	
3246	0-0,16 0,16-0,50 0,5-1,4	86,9 42,2 45,2	0,652 0,263 0,363	25,5	
3251	0-0,16 0,16-0,45	91,0 46,3	0,636 0,280	24,0	
	0,45-1,4	-	18,50	60,7	$R_{0,2} = m(\varphi_1 - 0,45)$

#### 4. Wnioski

1. Badane stale z mikrodotadkiem boru posiadają wyższe własności mechaniczne w porównaniu ze stałą St2A. Wydaje się celowe zastosowanie tych stali do produkcji śrub w klasach własności mechanicznych powyżej 6.9.

2. Wyprowadzone równanie ujmujące zależność  $R_{0,2}$  i  $\varphi_1$  pozwalają określić wartość  $\varphi_1$ , jakiemu należy poddać materiał, aby otrzymać z góry żądane wartości umownej granicy plastyczności.

3. Stale z mikrodotadkiem boru wykazały przy pomiarach dużą stabilność własności mechanicznych.

#### LITERATURA

- [1] Pełczyński T.: Wyznaczenie zastępczych krzywych umocnienia w próbie skręcania. Referaty konferencji na temat: Perspektywy nowych technologii przeróbki plastycznej w świetle teoretycznych i eksperymentalnych badań. CIOP - Poznań 1974 r.
- [2] Goldstein J.E., Słosikowa A.Z.: Wlianie bora, molibdenu, tytanu na odpusknaju chropkosti konstrukcyjnej stali. Termiczeskaja Obrabotka Miatalłow. 1973 nr 5.
- [3] Gładkowskij W.A., Korielin N.A.: Wlianie bora na przediel tikuozestii w zelezie alfa. Fizika Miatalłow i Miatalłowiedienie. T. 13 nr 5.
- [4] Pridancew M.W.: Wpływ domieszek pierwiastków ziem rzadkich na własności stopów. Katowice 1966 r. Wyd. Śląsk.
- [5] Feill A., Gawor J.: Odkształcalność stali w funkcji średniej drogi swobodnej w ferrycie i średniego ziarna ferrytu. Sprawozdanie IMZ Nr 1002/1973 r. (niepublikowane).
- [6] Bronsztejn I.N., Siemieniłow K.A.: Matematyka - poradnik encyklopedyczny. Warszawa 1968 r. PWN.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ  
С МАЛЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БОРА В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ

Р е з ю м е

Исследование изменения механических свойств низкоуглеродистых сталей с малым содержанием бора в процессе волочения. Кривые зависимости  $R_{0,2}(\xi)$ ,  $R_m(\xi)$ ,  $A_5(\xi)$ , и  $Z(\xi)$ .

Определенные кривые упрочнения показаны на диаграмме, приведены тоже их математические уравнения.

THE CHANGE OF MECHANICAL PROPERTIES OF LOW - CARBON STEEL  
WITH THE MICROADDITION OF BORON IN THE DRAWING PROCESS

S u m m a r y

The analysis of the change of mechanical properties, of low - carbon steel with the microaddition of boron, during the drawing process. The curves of dependence -  $R_{0,2}(\xi)$ ,  $R_m(\xi)$ ,  $A_5(\xi)$ ,  $Z(\xi)$  and curves of strain hardening, are shown on the diagram and put into mathematical form.