ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 18 Nr kol. 606

Andrzej SOBAŃSKI, Eugeniusz HADASIK
Janusz KOLARZ, Antoni PIĄTEK

Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

BADANIA PLASTYCZNOŚCI NOWEJ STALI "FERMANAL"

Streszczenie. Przedstawiono metodę badań plastyczności metodą skręcania na gorąco w zastosowaniu do nowej stali fermanal i wykazano jej przydatność do oceny wpływu składu chemicznego i fazowego stali. Omówiono możliwość uwzględnienia w próbie skręcania istotnych parametrów procesów obróbki plastycznej na gorąco. Dokonano oceny badanej stali pod względem podatności do kształtowania na zimno.

1. WPROWADZENIE

W Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej podjęto prace nad nowym gatunkiem stali o wysokiej wytrzymałości i dobrej plastyczności, której podstawowymi składnikami stopowymi są łatwo dostępne mangan i aluminium a szczególną cechą użytkową jest obniżony ciężar właściwy. Dążąc do optymalizacji składu chemicznego równolegle z analizą zjawisk strukturalnych badano wpływ obróbki cieplnej oraz odkształcenia plastyczne na gorąco i na zimno na własności wytrzymałościowe i plastyczne oraz inne cechy użytkowe [1-3]. Wynikiem badań było opracowanie nowego gatunku stali 60G30J9 nazwanej "fermanal" o wytrzymałości na rozciąganie powyżej 850 MPa, dobrej plastyczności na zimno i na gorąco, a równocześnie blisko 15% lżejszej od normalnych stali [4,5].

Przedstawione opracowanie obejmuje niektóre nie publikowane dotychczas badania plastyczności stali fermanal, charakterystyczne dla etapów optymalizacji składu chemicznego i doboru warunków obróbki plastycznej na gorąco. Omówiono również wyniki podstawowych badań plastyczności przy odkształceniu na zimno.

2. WPŁYW SKŁADU CHEMICZNEGO NA PLASTYCZNOŚĆ STALI FERMANAL W TEMPERATURACH OBRÓBKI PLASTYCZNEJ NA GORĄCO

Badaniami objęto materiały z siedmiu wytopów półtechnicznych, których skład chemiczny w zakresie podstawowych pierwiastków przedstawia tablica 1.

Tablica 1

Charakterystyczne własności badanych stali

Wytop nr	Zawartość pierwiastków %			Struktura w zakresie temperatur	$\sigma_{p\,max}$ [MPa] w temperat.		φ_{gr} w temperat.	
	C	Mn	Al	1200 K - 1425 K	1200 K	1425 K	1200 K	1425 K
1	0,10	24,6	3,9	austenityczno-ferrytyczna	180	80	2,4	2,8
2	0,10	33,7	4,1	austenityczna	240	140	3,8	9,0
3	0,48	25,0	4,2	austenityczna	320	140	6,0	9,5
4	0,10	22,8	8,7	ferrytyczno-austenityczna powyżej 1275 K ferrytyczna	170	55	4,7	70
5	0,10	34,9	8,3	ferrytyczno-austenityczna powyżej 1375 K ferrytyczna	210	60	1,9	55
6	0,40	22,0	8,2	austenityczno-ferrytyczna	240	80	2,0	3,0
7	0,77	36,2	9,0	austenityczno-ferrytyczna	350	130		

Badania plastyczności wykonano na plastometrze metodą skręcania z swobodą wydłużenia próbki [6]. Stosowano próbki o długości l_o = 10 mm i średnicy d_o = 6 mm. Próby prowadzono w przedziale temperatur 1200 do 1500 K przy stałej prędkości odkształcenia równej 9 s^{-1}. Skręcanie następowało w temperaturze nagrzewania po 15 minutach wytrzymania.

W trakcie skręcania rejestrowano moment skręcający M, zmianę długości próbki Δl oraz kąt skręcenia α w funkcji czasu. Wyniki, w oparciu o ogólnie przyjęte [7] wzory, przeliczono na wielkości naprężenia uplastyczniającego σ_p i odkształcenia zastępczego φ_p:

$$\sigma_p = \frac{4\sqrt{3}}{\pi d^3}\left(3M + \alpha \frac{dM}{d\alpha}\right),$$

$$\varphi_p = \frac{1}{2\sqrt{3}}\,\alpha \cdot \frac{d}{l},$$

gdzie:

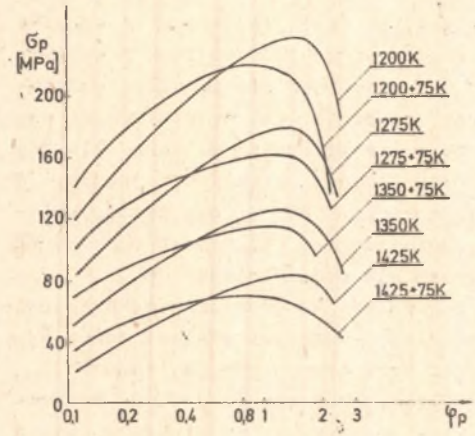
$$d = d_o\sqrt{\frac{l_o}{l}},$$

$$l = l_o + \Delta l,$$

Wielkość $\alpha \frac{dM}{d\alpha}$ wyznaczono graficznie z wykresu skręcania.

Przykład zależności $\sigma_p = f(\varphi_p)$ dla różnych temperatur skręcania T ilustruje rysunek 1. Dla pozostałych badanych materiałów otrzymano podob-

ne krzywe o charakterystycznym maksimum naprężenia $\sigma_{p\ max}$ w pobliżu wartości $\varphi_p \sim 1$, których końcowy punkt wyznacza graniczne odkształcenie pękania φ_{gr}. Zbiorczo wyniki prób dla wszystkich materiałów przedstawiono w postaci zależności $\sigma_{p\ max} = f(T)$ i $\varphi_{gr} = f(T)$ na rys. 2 i 3.

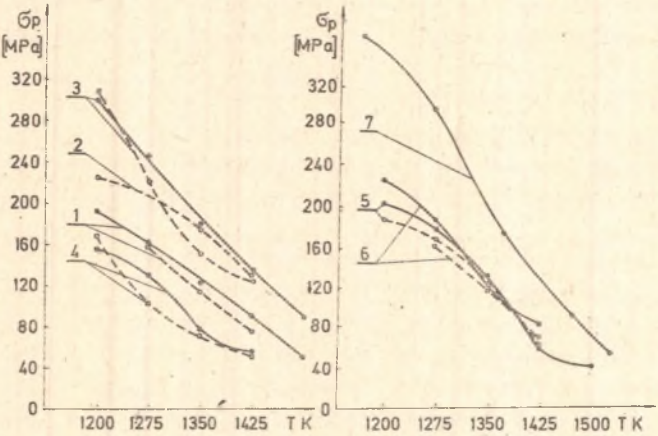


Rys. 1. Zależność naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia zastępczego dla stali wytopu 6. Cyfry na krzywych oznaczają temperaturę skręcania, +75 K oznaczono wyniki dla skręcania po wstępnym nagrzaniu do temperatury o 75 K wyższej

W dodatkowych badaniach ujawniono struktury w warunkach odkształcenia, nagrzewając próbki do temperatury skręcania i po wygrzaniu 15 min schładzając je w wodzie. W tablicy 1 sklasyfikowano badane materiały według struktur występujących przed rozpoczęciem skręcania w temperaturach 1200 i 1425 K.

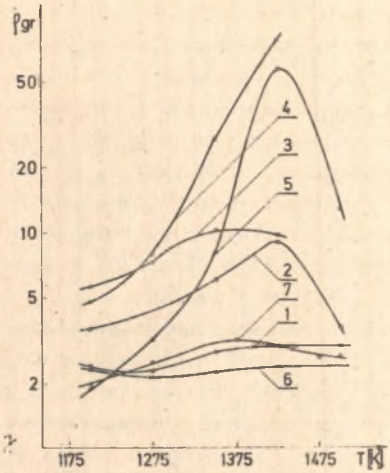
Poziom naprężenia uplastyczniającego i zależność jego maksymalnej wartości od temperatury korelują z zawartością głównych pierwiastków i udziałem faz w strukturze (rys. 2, tabl. 1).

W wysokiej temperaturze 1425 K wartości $\sigma_{p\ max}$ rosną ze zwiększe-



Rys. 2. Zależność maksymalnego naprężenia uplastyczniającego od temperatury skręcania dla stali wytopów 1 do 7. Linia przerywana oznacza wstępne nagrzanie o 75 K wyższe

niem udziału austenitu. W niskiej temperaturze 1200 K naprężenie uplastyczniające stali austenitycznych jest wyższe niż ferrytyczno-austenitycznych, jednak drugim istotnym czynnikiem jest ilość węgla, którego zwiększenie sprzyja tworzeniu umacniającego w tej temperaturze węglika Fe_3AlC [5]. Dlatego w całym zakresie temperatur od 1200 do 1500 K najwyższe wartości naprężenia uplastyczniającego wykazuje stal wytopu 7 o strukturze austenitycznej z małą ilością ferrytu i dużej zawartości węgla. W temperaturze 1200 K naprężenie uplastyczniające tej stali jest o ponad 50% większe niż stali 1H18N9T [8].



Rys. 3. Zależność odkształcenia granicznego od temperatury skręcania dla stali wytopów 1 do 7

Ze względu na graniczną odkształcalność między badanymi stalami można wyróżnić trzy grupy (rys. 3, tabl. 1).

W stalach wytopów 4 i 5 z podwyższeniem temperatury struktura staje się jednofazowa ferrytyczna, dlatego od 1200 do 1425 K funkcja $\varphi_{gr} = f(T)$ bardzo intensywnie wzrasta, osiągając w wysokich temperaturach bardzo duże wartości. Mała odkształcalność graniczna stali wytopu 5 w temperaturze 1200 K jest skutkiem względnie dużej ilości fazy austenitycznej w związku ze znacznie większą ilością manganu. Zarejestrowany spadek odkształcalności w temperaturze 1500 K wynika przypuszczalnie ze wzrostu ilości faz międzymetalicznych.

Stale z wytopów 2 i 3 o jednofazowej w przedziale temperatur 1200-1425 K strukturze austenitycznej wykazują dużą odkształcalność, wzrastającą z temperaturą. Spadek odkształcalności powyższej temperatury 1425 K wynika z powstania, znacznie różniącej się własnościami plastycznymi, fazy ferrytycznej.

Dwufazowe austenityczno-ferrytyczne w przedziale temperatur 1200-1425 K stale wytopów 1, 6 i 7 mają małą, nieznacznie zwiększającą się odkształcalność graniczną, niezależnie od zmiennych w szerokim zakresie zawartości ferrytotwórczego aluminium i austenitotwórczych manganu i węgla. Powyżej 1425 K zaznacza się zmniejszenie odkształcalności, zwłaszcza w stalach o większej ilości węgla. Spadek ten wynika ze zwiększenia ilości ferrytu. Mała odkształcalność i najwyższy poziom naprężenia uplastyczniającego pozwala określić tę grupę stali jako trudno odkształcalną na gorąco.

3. WPŁYW WARUNKÓW NAGRZEWANIA DO PRZERÓBKI PLASTYCZNEJ

W rzeczywistych warunkach obróbki plastycznej na gorąco temperatura nagrzewania jest wyższa od temperatury pierwszego odkształcenia, zwłaszcza w powierzchniowych warstwach metalu. W celu wyjaśnienia wpływu tego czynnika na naprężenie uplastyczniające i odkształcalność badanych stali wykonano serię badań, w których skręcanie następowało po obniżeniu temperatury o 75 K w stosunku do początkowej temperatury nagrzewania. Wyniki tej serii prób porównano z omówionymi wcześniej próbami, w których temperatura skręcania odpowiadała temperaturze nagrzewu. Analiza przebiegu krzywych na rys. 1 wskazuje, że dla odkształceń małych ($\varphi_p < 0,3-0,5$) naprężenie uplastyczniające jest wyższe przy wstępnym nagrzewaniu powyżej temperatury skręcania. Dla zakresu większych odkształceń wyższe wartości naprężenia uplastyczniającego odpowiadają skręcaniu w temperaturze nagrzewania, dlatego taką w zasadzie zależność obserwujemy dla wartości $\sigma_{p\,max}$ na rys. 2. Na wartości odkształcenia granicznego warunki nagrzewania praktycznie nie wpływają, tylko po nagrzaniu do 1500 K i skręcaniu w temperaturze 1425 K odkształcalność jest mniejsza, niż przy nagrzaniu i skręcaniu w tej temperaturze. Wiąże się to z przyczynami wyjaśnionymi uprzednio.

Omówiony wpływ warunków nagrzewania wskazuje na celowość takiego prowadzenia procesów walcowania lub kucia, przy których temperatura początku kształtowania plastycznego jest możliwie minimalnie niższa od ustalonej jako możliwie najwyższa temperatura nagrzewania. W tych warunkach plastyczność badanych stali jest najlepsza.

4. WPŁYW PRĘDKOŚCI ODKSZTAŁCENIA

Najkorzystniejsze własności austenityczno-ferrytycznej stali wytopu 7 (względnie lepsza odkształcalność na gorąco i najwyższa wytrzymałość) są uzasadnieniem przyjęcia jej do dalszych badań, których celem było zbliżenie parametrów do warunków walcowni prętów ze stali stopowych Huty Baildon.

Analiza danych pozwoliła ustalić, że w poszczególnych przepustach średnia prędkość odkształcenia zmienia się w zakresie od $\dot{\varphi} = 5\ s^{-1}$ do $\dot{\varphi} = 23\ s^{-1}$. Wartości te przyjęto jako skrajne w dodatkowych seriach prób skręcania w temperaturach 1175 K do 1525 K.

W wyniku badań nie stwierdzono istotnego wpływu prędkości odkształcenia na odkształcenie graniczne, natomiast wartości maksimum naprężenia uplastyczniającego były większe przy wyższej prędkości odkształcenia. Różnica około 40 MPa dla temperatury 1175 K maleje do około 20 MPa dla 1425 K (rys. 2, krzywa 7), czyli względny przyrost naprężenia uplastyczniającego od prędkości odkształcenia jest większy dla wysokich temperatur skręcania.

Dla poszczególnych temperatur wyniki aproksymowano wzorem:

$$\sigma_{p\ max} = C\dot{\varphi}^{m},$$

w którym:

$C = f(T)$ - stała o wymiarze naprężenia,

$m = f(T)$ - czułość na prędkość odkształcenia

zależą od temperatury skręcania T.

Pozwoliło to ustalić, że m zmienia się praktycznie liniowo od m = = 0,025 dla T = 1175 K do m = 0,16 dla T = 1475 K, co oznacza, że badana stal jest względnie mało czuła na prędkość odkształcenia.

5. SYMULACJA PROCESU ODKSZTAŁCANIA NIECIĄGŁEGO

Przy walcowaniu kęsa kwadratowego 80 mm na pręt okrągły 14 mm w przepustach pojedyncze wydłużenia odpowiadają zastępczemu odkształceniu φ_p = = 0,18 do 0,30, a czasy przerw są równe około 8 s pomiędzy przepustami siódmym do dziesiątego, pozostałe około 4 s.

Realizacja skręcania z sekwencjami odpowiadającymi tym warunkom, przy istniejącym oprzyrządowaniu posiadanego plastometru, możliwe była z prędkością odkształcenia $\dot{\varphi} = 1\ s^{-1}$. Przy stałej temperaturze nagrzewania, równej temperaturze początkowej skręcania T = 1425 K, wykonano dwa warianty prób z pojedynczymi odkształceniami, stale równymi φ = 0,19 lub φ = 0,29 i pauzami odpowiadającymi czasom przerw pomiędzy przepustami (rys. 4).

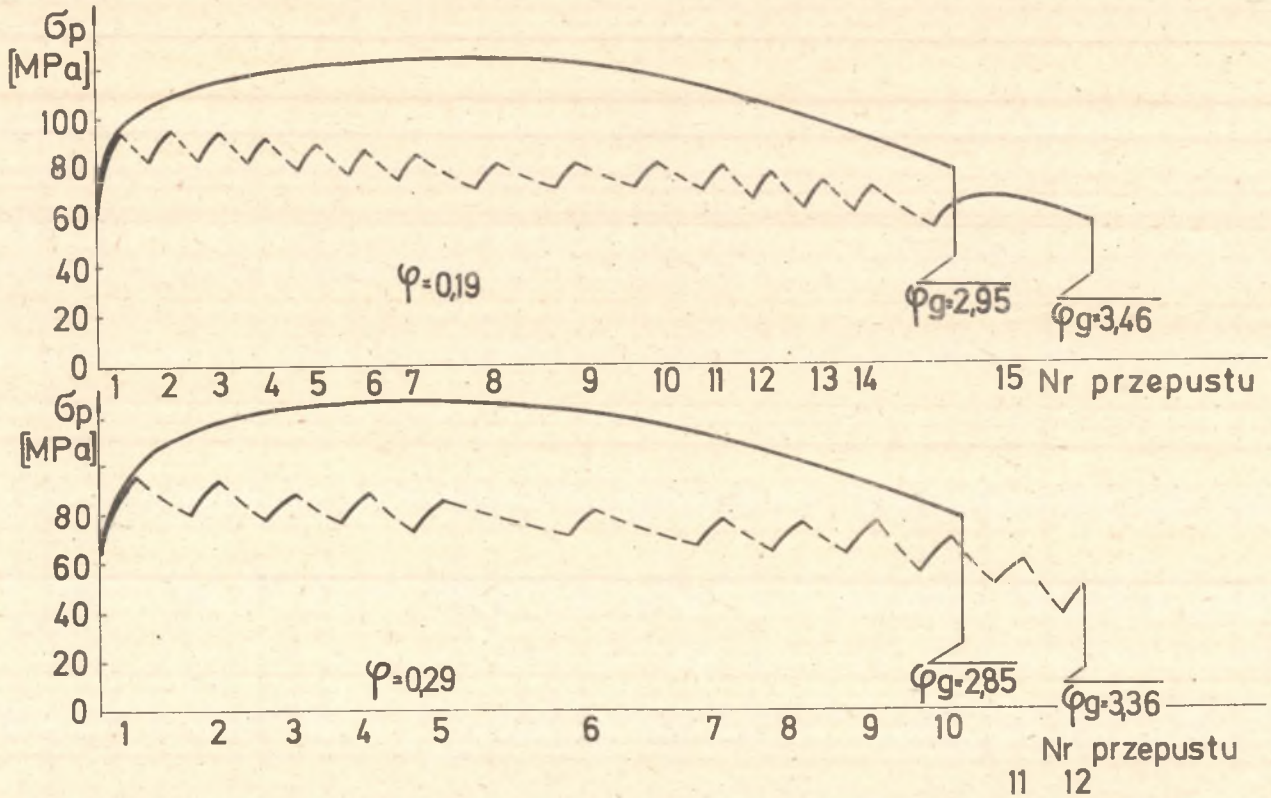
W wariancie pierwszym dla φ = 0,19 próbki nie pękały do czternastego skręcenia, dlatego skręcenie piętnaste prowadzono do zniszczenia. Odkształcenie graniczne było w tym przypadku równe średnio φ_{gr} = 3,46. W wariancie drugim, przy φ = 0,29, próbki nie wytrzymywały czternastu skręceń, Pękając najczęściej w czasie dwunastego i wykazując średnio φ_{gr} = 3,36. Wartości te, mało różniące się od siebie, są niewiele wyższe od wyników skręcania ciągłego tej stali (rys. 3, wytop 7).

Wartość naprężenia uplastyczniającego w pierwszym cyklu skręcania nieciągłego odpowiada początkowemu przebiegowi krzywej ciągłej. W zakresie większych odkształceń naprężenie uplastyczniające zmniejsza się, intensywniej dla wariantu większych odkształceń pojedynczych.

Zaobserwowane efekty świadczą o zachodzącej przy zastosowanych czasach pauz częściowej rekrystalizacji.

6. PODATNOŚĆ DO KSZTAŁTOWANIA PLASTYCZNEGO NA ZIMNO

Stal 60G30J9 wykazała korzystne własności plastyczne A_5 i Z przy wysokiej wytrzymałości [5]. W stanie surowym R_m = 900 do 1100 MPa przy A_5=15



Rys. 4. Zmiany naprężenia uplastyczniającego stali wytopu 7 przy ciągłym i nieciągłym skręcaniu w temperaturze 1425 K, z dwiema wielkościami odkształcenia pojedynczego

do 25%, po przesycaniu wytrzymałość zmniejsza się a wydłużenie istotnie rośnie. Przykładowo, [3] dla stali zawierającej 0,61% C, 29,6% Mn i 8,8% Al, przy wyjściowych po walcowaniu na gorąco własnościach R_m = 980 MPa i A_{50} = 19,5%, po przesycaniu w zakresie temperatur austenityzacji 1075 do 1475 K otrzymano R_m = 700 do 840 MPa i A_{50} = 23 do 45%. Optymalną korelację wytrzymałości i plastyczności zapewnia temperatura 1275 do 1325 K. Wyniki te wskazują na celowość bliższego zbadania podatności do kształtowania plastycznego na zimno.

W objętościowych procesach kształtowania w obszarach niebezpiecznych występują stany naprężeń o przewadze rozciągania. Zdolność do odkształcenia właściwie charakteryzuje w tym przypadku krzywa odkształcalności, określona na podstawie [9] próbami skręcania oraz rozciągania próbek gładkich i z karbem jako funkcja:

$$\varphi_{gr} = f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right),$$

gdzie:

σ_m - naprężenie średnie,

σ_i - naprężenie zastępcze według hipotezy Hubera.

Wyniki prób dla stali fermanal o zawartości C = 0,67%, Mn = 29,4% i Al = 9,0% w stanie surowym i po przesycaniu w wodzie od temperatury 1325 K pokazano na rys. 5. Porównanie wskazuje na dobrą odkształcalność stali fermanal, w stanie przesyconym zbliżoną do odkształcalności stali KH18N9 a w stanie surowym do konstrukcyjnej stali SPW 18G2VA.

Dla procesów, w których graniczny stan objawia się tworzeniem lokalnego przewężenia, ogólnie uznaną [10] cechą charakteryzującą jego przydatność jest wykładnik n potęgowej funkcji umocnienia:

$$\sigma_p = C\varphi_p^n,$$

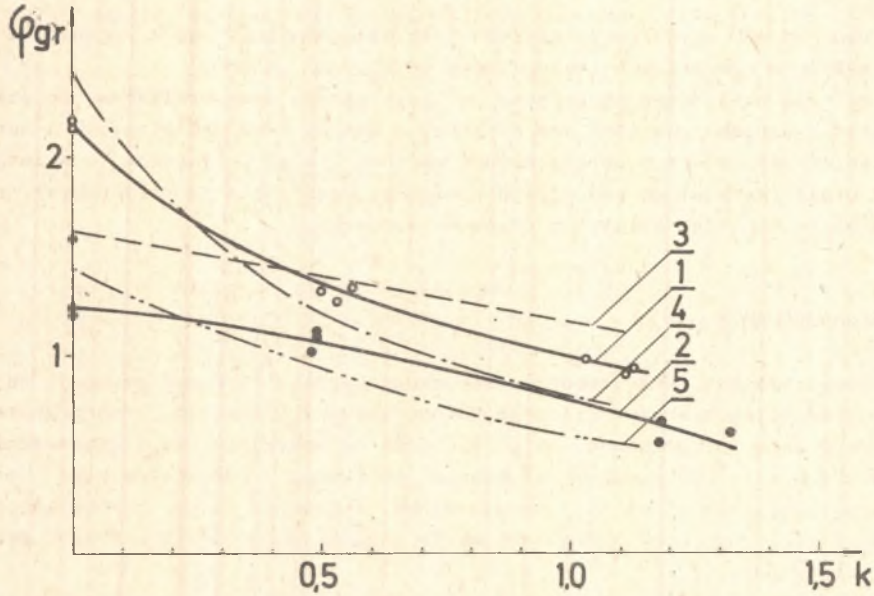
w której stała C jest wartością naprężenia uplastyczniającego osiąganego przy odkształceniu φ_p = 1.

Aproksymowanie wyników prób rozciągania pozwoliło wyznaczyć dla badanej stali:

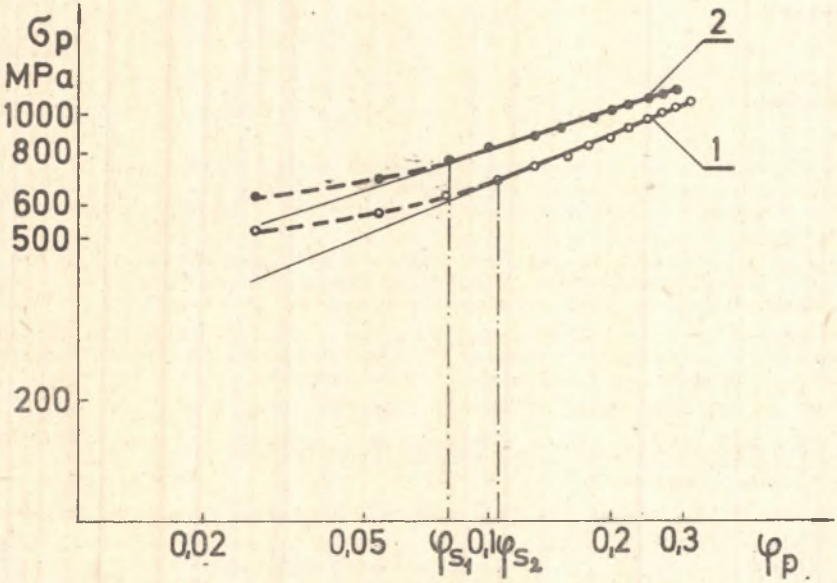
w stanie surowym n = 0,27, C = 1540 MPa,
po przesycaniu n = 0,32, C = 1440 MPa.

Bliższa analizy wykazała niezupełną korelację wyników do funkcji potęgowej. W układzie podwójnie logarytmicznym punkty w zakresie małych odkształceń układają się na krzywej rosnącej, a dopiero począwszy od pewnej krytycznej wartości odkształcenia φ_s = 0,08 do 0,1 tworzą prostą, odpowiadającą funkcji potęgowej o stałych:

w stanie surowym n = 0,33, C = 1730 MPa,
po przesycaniu n = 0,40, C = 1700 MPa.



Rys. 5. Krzywe odkształcalności w temperaturze otoczenia badanej stali fermanal w stanie przesyconym (1) i po walcowaniu na gorąco (2) w porównaniu do stali OH18N9 (3) armco (4) i 18G2VA (5)



Rys. 6. Zależność naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia badanej stali fermanal w stanie przesyconym (1) i po walcowaniu na gorąco (2) w temperaturze otoczenia

Taki sposób wyznaczenia stałych jest słuszniejszy, gdyż graniczne odkształcenie równomierne jest większe od φ_s.

Wartość wykładnika umocnienia n jest bardzo duża, zbliżona do stali austenitycznych typu 18-8, co świadczy o dobrej odkształcalności. Natomiast określona w ten sposób wysoka wartość stałej C świadczy o skłonności stali fermanal do umocnienia zgniotem. Umocnienie to przy dużych odkształceniach mało zależy od stanu wyjściowego.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań plastyczności stali fermanal wskazują na duże perspektywy zastosowania tego nowego gatunku. Chociaż jego odkształcalność przy kształtowaniu na gorąco jest ograniczona, to w odpowiednich warunkach może być poddany walcowaniu lub kuciu. Odkształcalność przy kształtowaniu na zimno jest bardzo dobra, a głównym w tym przypadku problemem jest duży opór związany z ważną z użytkowego punktu widzenia wysoką wytrzymałością.

Omówione badania wykazują również dużą przydatność plastometrycznej próby skręcania na gorąco. Pozwala ona oceniać i porównywać stale o zróżnicowanym składzie chemicznym i fazowym, stając się ważnym elementem optymalizacji. Umożliwia prowadzenie prób ujawniających wpływ różnorodnych czynników ważnych z punktu widzenia technologii, na plastyczność badanych materiałów.

LITERATURA

[1] Woźnica H. i in.: Opracowanie wstępnej optymalizacji składu chemicznego oraz założeń technologicznych wytwarzania nowych stali Mn-Al. Sprawozdanie z prac IIM w probl. międzyres. I-22 1977 (nie publikowane).

[2] Woźnica H. i in.: Przemiany fazowe w stali typu fermanal i próba interpretacji mechanizmów umocnienia. Sprawozdanie z prac IIM w probl. międzyres. I-22, 1978 (nie publikowane).

[3] Sobański A. i in.: Określenie podatności stali fermanal do kształtowania plastycznego w temperaturach 20 do 1200°C. Spraw. z prac IIM w probl. międzyres. I-22, 1978 (nie publikowane).

[4] Gierek A., Woźnica H., Mazan J.: Hutnik, 1978 r, nr 2, s. 80.

[5] Woźnica H.: Wpływ składu chemicznego i procesów technologicznych na stabilność struktury stali 60G30J9. ZN Polit.Śl. Hutnictwo z. 17, Gliwice 1978.

[6] Misiołek Z., Piętek A.: Rudy i Metale Nieżelazne, t. 22 (1977), nr 4, ss. 201-205.

[7] Stüwe H.P., Turck H.: Z. Metallkunde, t. 55 (1964), nr 11, ss. 699-703.

[8] Tretjakow A.W., Zjuzin W.J.: Mechaniczeskije swojstwa metałłow i spławow pri obrabotkie dawleniem, Mietałłurgia, Moskwa 1973.

[9] Lamber T., Grosman F.: ZN Polit. Śląskiej, Hutnictwo z. 6 (1976) ss. 87-110.

[10] Marciniak Z.: Odkształcenia graniczne przy tłoczeniu blach, WNT, Warszawa 1971.

ИСПЫТАНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ НОВОЙ СТАЛИ ФЕРМАНАЛ

Р е з ю м е

В статье рассматривается метод испытаний пластичности методом горячим скручиванием в применении к новой стали ферманал и показана её пригодность для оценки влияния химического и фазового состава стали. Были установлены возможности учёта в испытании кручения существенных параметров процесса горячей обработкой давлением. Установлено оценку стали относительно податливости к холодной формовке.

THE EXAMINATION OF PLASTICITY OF NEW FERMANAL STEEL

S u m m a r y

The method of research on plasticity by means of hot torsion used in the case of new fermanal steel has been introduced, and its usefulness in estimation of the influence of chemical composition and phase composition of steel has been proved. The possibility of taking into account the essential parameters of hot plastic working process in the torsion test was discussed.

The estimation of the examined steel in the respect of susceptibility to cold plastic working has been performed.