

Henryk WOŹNICA, Jerzy MAZAN, Wacław SUPERNAK

Instytut Inżynierii Materiałowej

Politechnika Śląska

STRUKTURA I WŁASNOŚCI AUSTENITYCZNO-FERRYTYCZNYCH  
STALI MANGANOWO-ALUMINIOWYCH

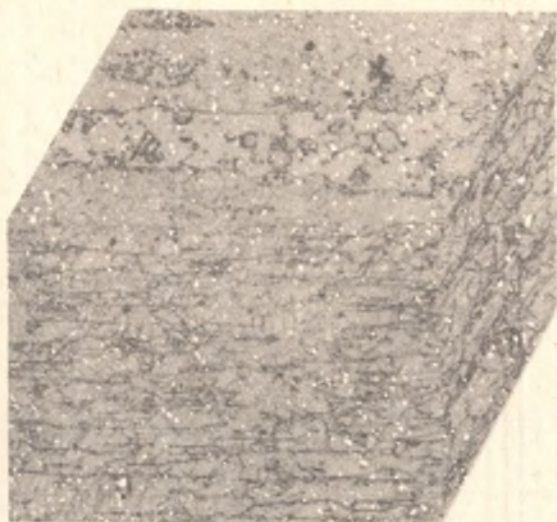
**Streszczenie.** Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu składu chemicznego na strukturę i własności stali wysokomanganowej. Określono, że optymalny zespół własności mechanicznych posiada stal o strukturze dwufazowej składającej się z austenitycznej osnowy wzmocnionej wąskimi równoległymi pasmami ferrytu. Przedstawiono podstawowe własności mechaniczne jak również charakterystykę stali 60G30J9 po gorącym walcowaniu oraz po gniocie. Stal 60G30J9 wykazuje dużą skłonność do umacniania w wyniku odkształceń na zimno.

WSTĘP

Zastosowanie manganu jako pierwiastka stopowego w stalach jest odwrotnie proporcjonalne do jego dużych światowych zasobów. Mangan jest używany jako dodatek zwiększający hartowność w stalach konstrukcyjnych i narzędziowych do zawartości jedynie 1,8%, jako zamiennik niklu w stalach oszczędnościowych typu 18-8 w ilości kilku procent i wreszcie jako główny składnik stopowy stali Hadfielda 11G12, której specyficznych własności nie uzyskano dla innych stopów.

Zwiększenie zawartości manganu powyżej 12% powoduje pojawienie się w strukturze obok martenzytu  $\alpha'$  także martenzytu  $\zeta$ . Maksimum zawartości fazy  $\zeta$  otrzymuje się dla 17% Mn, zaś powyżej 28% tego pierwiastka jedyną występującą fazą jest austenit [1]. Niska energia błędu ułożenia austenitu manganowego pozwala na odpowiednie kształtowanie struktury dyslokacyjnej roztworu  $\eta$ , zapewniającej wysokie własności wytrzymałościowe przy zachowaniu dobrej plastyczności stali. W porównaniu z austenitem niklowym austenit manganowy posiada wyższy stosunek  $R_{0,2}/R_m$ .

Jedną z zasadniczych wad stali wysokomanganowych jest stosunkowo niska odporność na utlenianie w temperaturach podwyższonych. W stalach oszczędnościowych problem ten rozwiązano przez dodatek kilkunastu procent chromu, a w przypadku stali wysokomanganowych przez dodatek kilku procent aluminium. Pierwiastek ten korzystnie oddziałuje na zwiększenie przyczepności złożonych warstw tlenkowych powstających na stalach wysokomanganowych [2].

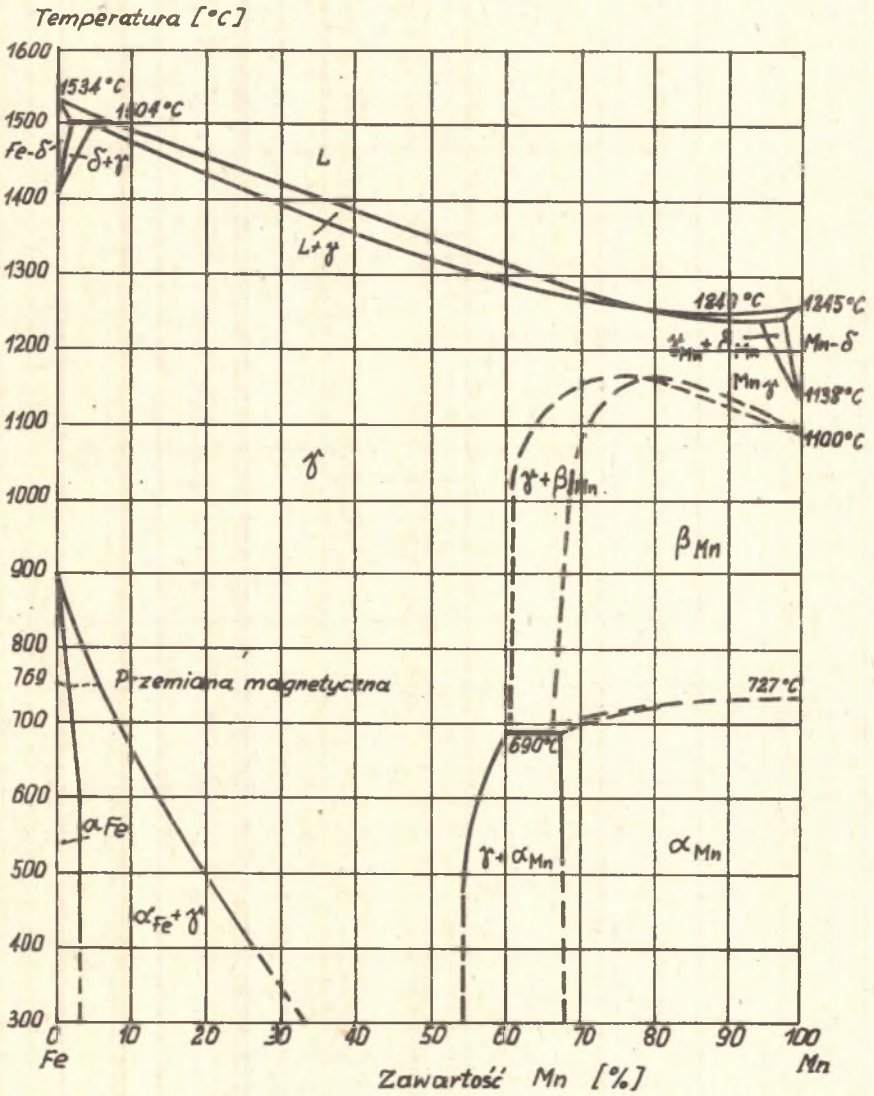


Rys. 1. Struktura przestrzenna stali Fermanal. Widoczne pakietowe wydzielania ferrytu

Przez odpowiedni dobór składu chemicznego, a w szczególności manganu, węgla i aluminium można otrzymać strukturę dwufazową austenitowo-ferrytyczną. Struktura (rys. 1), składająca się z plastycznej osnowy fazy  $\gamma$ , w której będą występować równoległe wąskie pasma ferrytu, powinna zagwarantować wysokie własności wytrzymałościowe przy równocześnie bardzo dobrych plastycznych w szerokim zakresie temperatur.

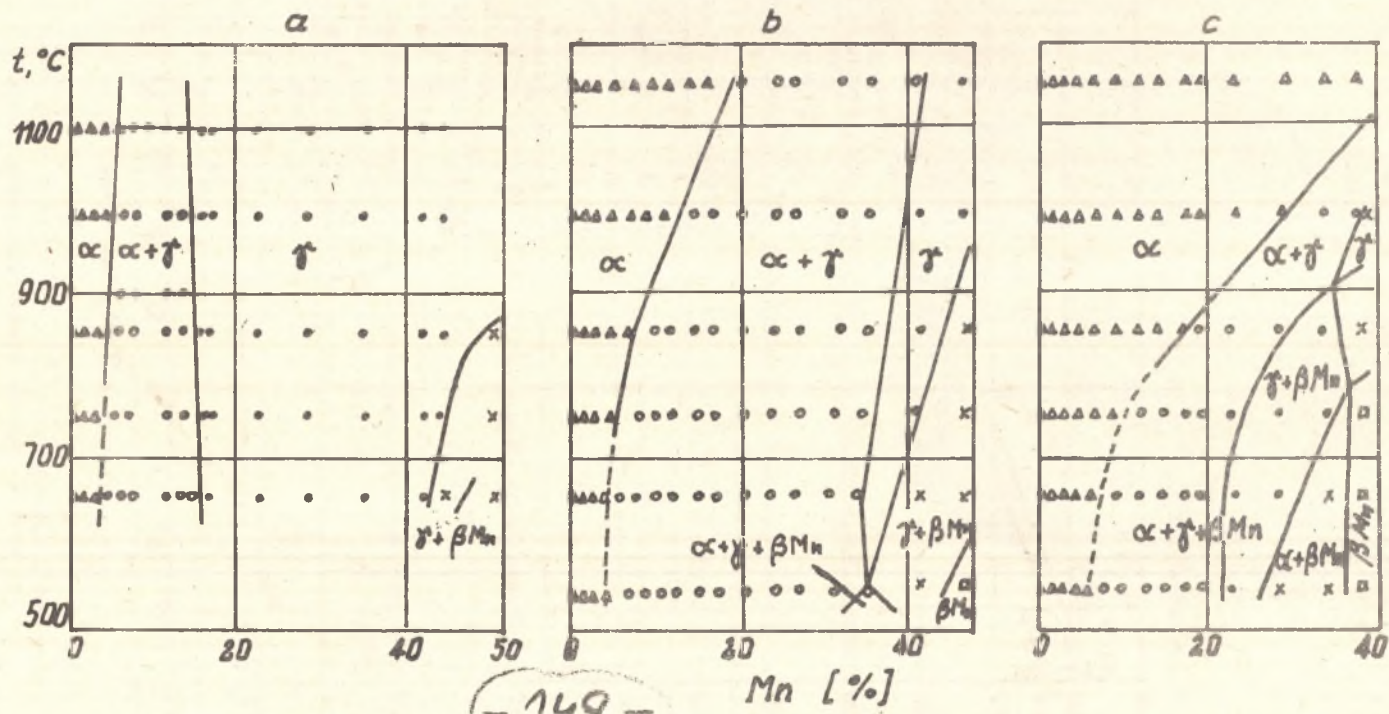
#### WPLYW SKŁADU CHEMICZNEGO NA STRUKTURĘ STALI MANGANOWO-ALUMINIOWYCH

W przypadku stali Mn-Al znaczenie znanego układu równowagi Fe-Mn (rys. 2) jest ograniczone. Wpływ węgla, a przede wszystkim aluminium jest bardzo istotny i w związku z tym dopiero opracowanie politermicznych układów równowagi w stopach Fe-Mn-Al dało możliwość wstępnej orientacji co do wpływu Al na strukturę stali. Przy stałej zawartości węgla w granicach 0,04%, dodatek 4% Al powoduje rozszerzenie pola występowania mieszaniny faz  $\alpha$  i  $\gamma$  do około 17-18% Mn i jednocześnie zawężenie zakresu istnienia fazy  $\gamma$  w stosunku do układu Fe-Mn (rys. 3). Wzrost koncentracji Al do 7% rozszerza znacznie zakres dwufazowy  $\alpha + \gamma$ . Obszar austenitu zostaje zawężony i przesunięty do temperatur powyżej 600°C. Dla zawartości 10% Al obszar czystego austenitu występuje już tylko w temperaturach powyżej 900°C dla wąskiego zakresu stężeń Mn. Ponadto jeżeli dla zawartości 4% Al faza  $\beta$ -Mn pojawia się przy koncentracji około 40% manganu, to przy 7% i 10% Al odpowiednio przy około 30% i 20% Mn (rys. 3). Korzystając z politermicz-

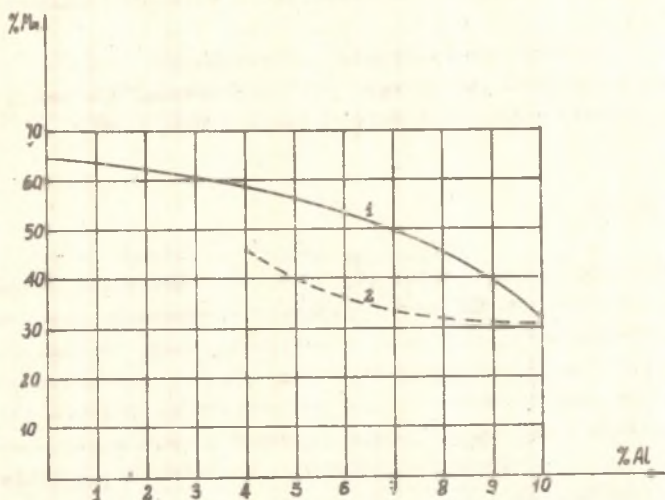


Rys. 2. Wykres równowagi stopów Fe-Mn

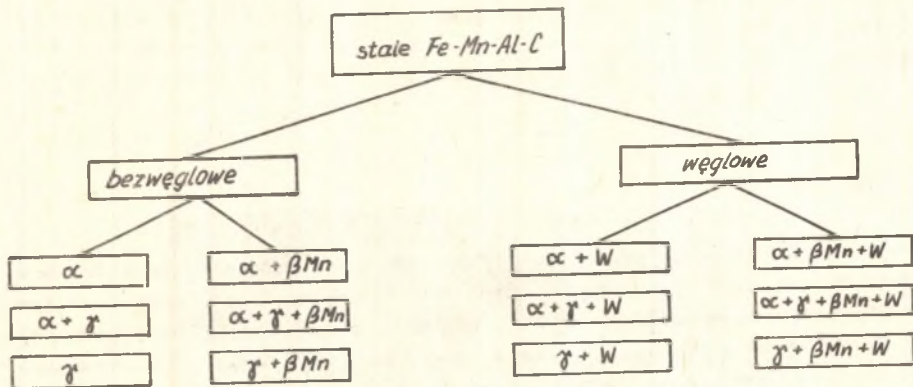




Rys. 3. Politermiczne przekroje układu fazowego Fe-Mn-Al przy stałej zawartości aluminium, a - 4% Al; b - 7% Al; c - 10% Al



Rys. 4. Wpływ aluminium na zmianę koncentracji Mn w fazie  $\beta$ -Mn  
 1 - krzywa dla 630°C, 2 - krzywa dla temperatur starzenia



Legenda :

$\alpha$  - ferryt  
 $\gamma$  - austenit  
 W - węgliki

Rys. 5. Wpływ składu chemicznego na strukturę stali manganowo-aluminowych

nych przekrojów układu fazowego Fe-Mn-Al, które przedstawiono na rys. 3, można w przybliżeniu określić charakter zmian stężenia manganu w fazie  $\beta$ -Mn (rys. 4).

W stopach technicznych w zależności od dobrego składu chemicznego możemy uzyskać struktury jak na rys. 5 - ferrytyczną, austenityczną, mieszaną a przy wyższej zawartości Mn dodatkowo z fazą  $\beta$ -Mn.

#### CEL I ZAKRES BADAŃ

Na podstawie poprzednich badań [1, 3, 4, 5] opracowano szereg stali o różnych składach chemicznych umożliwiającą otrzymanie struktur ferrytycznej, ferrytyczno-austenitycznej i austenitycznej. Po zbadaniu własności mechanicznych określono skład chemiczny stali, która posiadała najkorzystniejszy ich zespół. Jednocześnie przeprowadzone badania strukturalne dały informację na temat wpływu węgla na skład fazowy stali. Następnie przeprowadzono szczegółowe badania strukturalne i własności mechaniczne stali uznanej za optymalną.

W celu rozwiązania wymienionych zadań przeprowadzono:

- badania mikrostruktury na mikroskopie świetlnym,
- badania substruktury na mikroskopie elektronowym (technika cienkich folii),
- rentgenowską analizę fazową,
- statystyczną próbę rozciągania,
- pomiary twardości,
- pomiary zawartości fazy ferrytycznej,
- analizę dylatometryczną.

#### METODYKA BADAŃ

Obserwacje metalograficzne przeprowadzono na zglądach trawionych w 10% nitalu, na mikroskopie MeF-2 firmy Reichert. Określenia zawartości ferrytu dla badanych mikrostruktur dokonano za pomocą metody siatkowej [7] oraz pomiarów na urządzeniu Ferrigemaltmesser 1053. Badania substruktury wykonano na mikroskopie elektrycznym przy napięciu 100 kV metodą cienkich folii. Rentgenowską analizę fazową wykonano przy użyciu dyfraktometru typu JDX-7S firmy JEOL z anodą miedziową i filtrem żelaznym. Identyfikację faz przeprowadzono metodą Hanawalta w oparciu o kartotekę ASTM. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD 10/90 firmy VEB Werkstoffprüfmaschinen zgodnie z normą PN-71/H 04310. Pomiary twardości przeprowadzono na twardościomierzu typu PO 250 firmy Werkstoffprüfmaschinen przy obciążeniu 80 kG. Badania zmian objętości właściwej wykonano na dylatometrze różnicowym GMBH Wetzlar firmy Leitz, stosując powiększenia 200:1.



## WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH

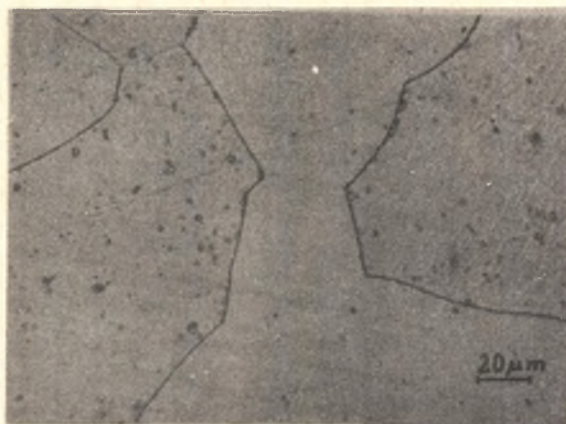
Składy chemiczne przeprowadzonych wytopów przedstawia tablica 1. Dwa pierwsze z nich posiadają po przesyonięciu strukturę ferrytyczną, (rys. 6), wytop 3 i 4 mieszaną ferrytyczno-austenityczną (rys. 7), i dwa ostatnie austenityczną (rys. 8).

Tablica 1

Skład chemiczny wlewków wg analizy wytopowej

Nr wytopu	Skład chemiczny (%)							
	C	Mn	Al	Si	P	S	Mo	Ti
1	0,04	28,5	9,2	0,14	0,08	0,014		
2	0,01	28,7	9,6	0,07	0,05	0,05	0,107	0,02
3	0,25	31,45	9,2	0,61	0,03	0,021	0,11	0,1
4	0,55	30,55	9,0	0,49	0,02	0,018	0,12	0,1
5	0,31	21,6	5,0	0,13	0,02	0,017	1,0	0,13
6	0,29	22,5	5,4	0,12	0,002	0,017	1,17	0,35

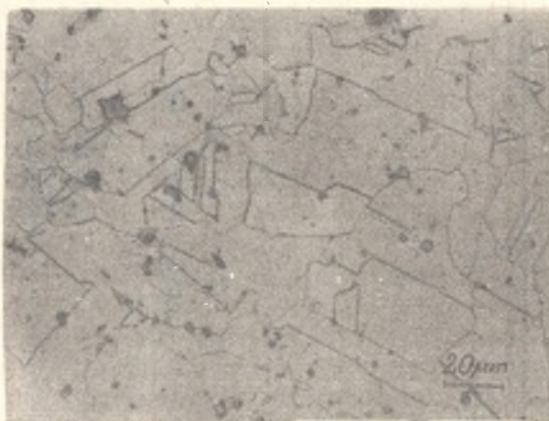
W przypadku 4 pierwszych wytopów oznaczającym decydującym o wystąpieniu w strukturze austenitu jest węgiel. Zwiększenie jego zawartości z 0,01% do 0,025% prowadzi do uzyskania około 50% austenitu, a dalszy wzrost do 0,55% C do ograniczenia ilości ferrytu do około 10-15% [4] (rys. 9).



Rys. 6. Struktura ferrytyczna z wydzieleniami wewnątrz ziarn

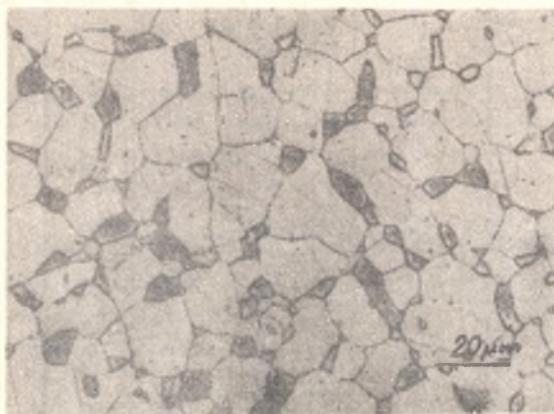


Rys. 7. Struktura ferrytyczno-austenityczna z wydzieleniami



Rys. 8. Struktura austenityczna z wydzieleniami





Rys. 9. Struktura austenityczno-ferrytyczna

Porównując wytopy 3, 5 i 6 można stwierdzić, że dla podobnej zawartości węgla zmniejszenie aluminium z 9,2% do 5,0% przy jednoczesnym obniżeniu koncentracji manganu do około 22% spowodowało zanik fazy ferrytycznej.

#### WŁASNOŚCI MECHANICZNE

Własności mechaniczne wymienionych sześciu wytopów przedstawia tablica 2. Własności wytrzymałościowe grup ferrytycznej i mieszanej (o wysokiej zawartości Mn i Al) są zbliżone i znacznie wyższe od własności stali austenitycznych [5 i 6]. Wysokie własności plastyczne posiada grupa stali o strukturze mieszanej i austenitycznej. Stałą o wyjątkowo dobrej udarności jest stal z wytopu 3, o strukturze złożonej mniej więcej z równych ilości ferrytu i austenitu. Zdecydowanie najkorzystniejszym zespołem własności mechanicznych charakteryzuje się stal z wytopu 4, dla której przyjęto symbol 60G30J9.

Tablica 2

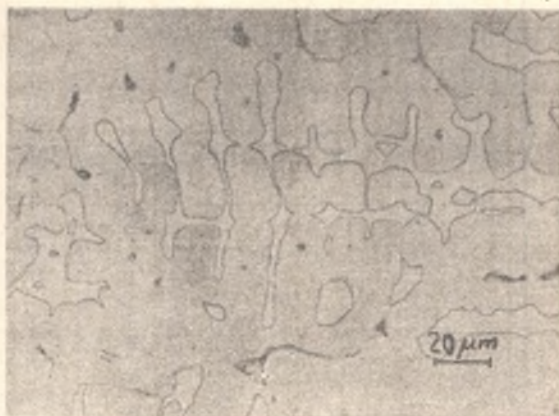
#### Wyniki badań własności mechanicznych

Numer wytopu	$R_{0,2}$	$R_m$	$R_e/R_m$	$A_5$	$Z$	$U$	$HB$
	$\text{kG/mm}^2$	$\text{kG/mm}^2$	-	%	%	$\text{kGm/cm}^2$	$\text{kG/mm}^2$
1	56,2	76,2	0,74	17,3	20,8	16,3	274
2	60,1	89,4	0,67	29,3	44,5	-	281
3	60,5	91,7	0,66	34,3	44,2	22,9	263
4	64,7	95,5	0,68	43,1	62,6	13,1	262
5	30,3	61,9	0,49	46,8	67,3	13,7	269
6	40,3	71,6	0,56	41,6	62,2	13,4	217

## CHARAKTERYSTYKA STRUKTURALNA STALI 60C30J9

Stal po odlaniu posiada dwufazową strukturę austenityczno-ferrytyczną, w której ferryt występuje w postaci dendrytów, a osnowę stanowi austenit (rys. 10). Udział objętościowy ferrytu wynosi podobnie jak dla stali wyciętej 4 około 10%. W wyniku przeróbki plastycznej na gorąco dendryty ferrytu zostają spłaszczone, tworząc pakiety (walcowanie blach), względnie ulegają wydłużeniu (walcowanie prętów), (rys. 1). Badania substruktury pozwoliły na stwierdzenie dużej gęstości dyslokacji w obszarach austenitu (rys. 11) i znacznie mniejszej w ferrycie (rys. 12). W austenicie ujawniono także pojedyncze, duże sferoidalne wydzielenia węglików typu  $Mn_3AlC$  (rys. 13 i 13a).

Po odkształceniu plastycznym na zimno zanika pakietowy układ ferrytu (rys. 14), a miejscami pojawia się komórkowa struktura dyslokacyjna. Zmiany strukturalne pociągają oczywiście za sobą zmiany własności mechanicznych (rys. 15, 16). W obydwu przypadkach przy 30% gniołu występuje zmiana charakteru krzywych.  $R_m$  dla drutów zmienia się w granicach od 900 MPa do około 1700 MPa, po przeciągnięciu gniołem sumarycznym 78%. Umowna granica plastyczności rośnie z 600 MPa do 1280 MPa dla około 31% gniołu i do około 1650 MPa dla gniołu maksymalnego 78%. W przypadku walcowania blach  $R_m$  i  $R_{0,2}$  silnie wzrasta do 10% gniołu. Dla wyższych stopni odkształcenia przyrosty własności wytrzymałościowych są mniejsze. Gwałtowny spadek wydłużenia względnego z około 30% do 3% występuje w zakresie do 30% gniołu.



Rys. 10. Struktura austenityczna z dendrytami ferrytu

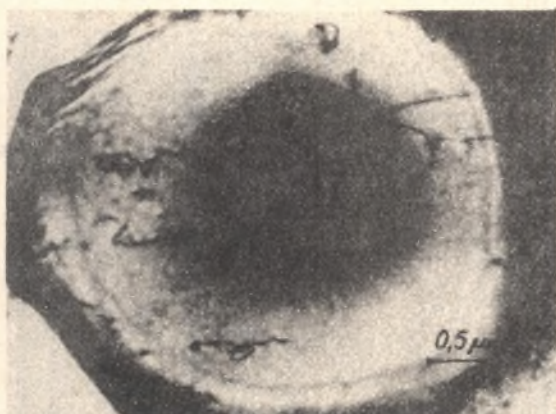


Rys. 11. Struktura po gorącym walcowaniu. Austenit o dużej gęstości dyslokacji z bliźniakami rekrytalizacji

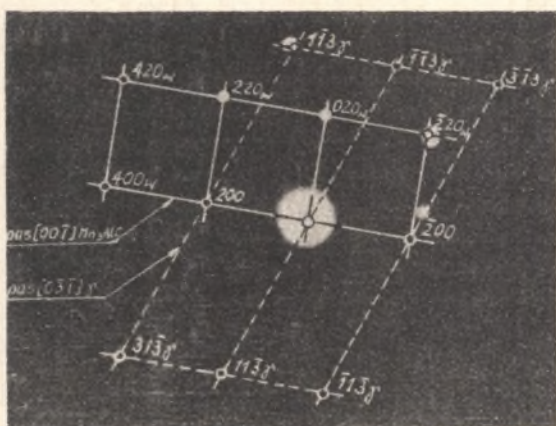


Rys. 12. Struktura po gorącym walcowaniu. Ferryt z niskokątowymi granicami ziaren. W osnowie widoczne liniowe dyslokacje tworzące miejscami układ komórkowy





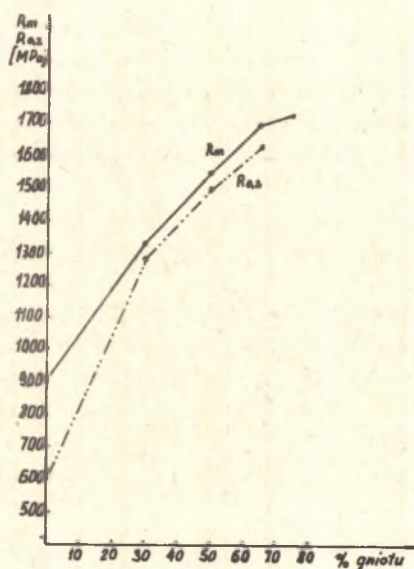
Rys. 13. Struktura po gorącym walcowaniu. Wydzielenie węglika  $Mn_3AlC$  z pojedynczymi dyslokacjami w austenicie



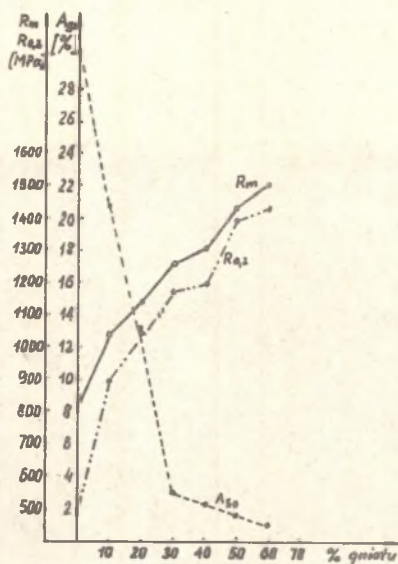
Rys. 13a. Obraz dyfrakcyjny osnowy i wydzielenia przedstawionego na rys. 12



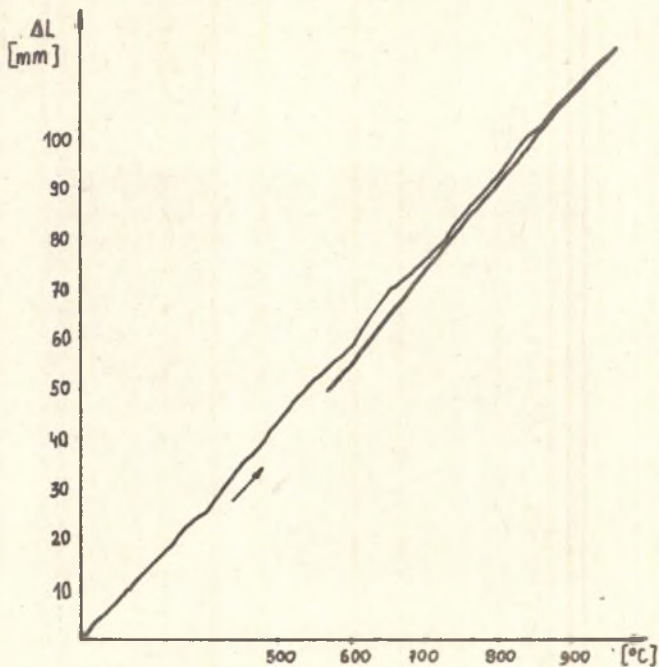
Rys. 14. Struktura po 90% gniocie. Silnie odkształcony austenit w kierunku walcowania



Rys. 15. Wpływ gniotu na własności stali Fermanal

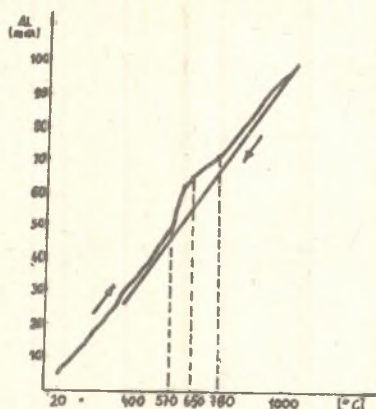


Rys. 16. Wpływ gniotu walcowania na własności stali Fermanal



Rys. 17. Krzywa dylatometryczna próbki po gorącym walcowaniu





Rys. 18. Krzywa dylatometryczna próbki odkształczonej gniotem 90%

zmniejszenie przyrostu wydłużenia próbek. Po wykonaniu analizy rentgenograficznej próbek pobranych z przerwane go badania dylatometrycznego stwierdzono, że źródłem przyrostu wydłużenia względnego była faza  $FeMn_4$ .

Przeprowadzona analiza dylatometryczna dla stali w stanie gorącowa-  
lowanym oraz odkształconym plastycznie na zimno wykazała zdecydowane różnice pomiędzy tymi przypadkami (rys. 17, 18). Stwierdzono minimalne zmiany objętości dla próbek z materiału walcowanego na gorąco, podgrzanych powyżej temperatury  $500^{\circ}C$ , natomiast dla próbek odkształconych gniotem 90% krzywa posiada dwa charakterystyczne zakresy.

W przedziale temperatur od 570 do  $650^{\circ}C$  następuje wyraźny przyrost wydłużenia względnego, natomiast od temperatury  $650-750^{\circ}C$  stwierdzono

#### WNIOSKI

1. Największy wpływ na strukturę stali wysokomanganowych posiada węgiel a następnie aluminium.
2. Najniższe własności wytrzymałościowe posiadają stale o strukturze austenitycznej, natomiast najniższe plastyczne - stale ferrytyczne.
3. Najlepszym zespołem własności mechanicznych dysponuje stal średniowęglowa o strukturze austenityczno-ferrytycznej, gdzie ferryt pod wpływem przeróbki plastycznej tworzy wąskie, równoległe pakiety, wzmacniające plastyczną osnowę roztworu.
4. Zgniot austenitu manganowo-aluminiowego na zimno powoduje znaczne przyrosty własności wytrzymałościowych (podobnie jak dla stali chromowo-niklowych).
5. Wgrzewanie stali 60G30J9 odkształczonej gniotem na zimno (90%) w zakresie temperatur 570 do  $650^{\circ}C$  prowadzi do wydzielenia fazy  $FeMn_4$ , czemu towarzyszy przyrost objętości właściwej.

#### LITERATURA

- [1] Holden A., Bolton J., Petty E.: Journal of the Iron and Steel Institute nr 8, 1971.
- [2] Woźnica H.: Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., Hutnictwo z. 17, Gliwice 1978.

- [3] Bogaczew J.N., Jegolajew W.F.: Struktura i svojstwa żelazomarcowych spławow. Metalurgija, Moskwa 1973.
- [4] Woźnica H. i in.: Opracowanie wstępnej optymalizacji składu chemicznego oraz założeń technologicznych wytwarzania nowych stali Mn-Al. Sprawozdanie z problemu międzyresortowego I-22.
- [5] Woźnica H. i in.: Przemiany fazowe w stali typu FERMANAL i próba interpretacji mechanizmów umocnienia. Sprawozdanie z problemu międzyresortowego I-22.
- [6] Gierek A., Woźnica H., Mazan J.: Hutnik nr 2, 1978.
- [7] Ryś J.: Wstęp do metalografii ilościowej "Śląsk", Katowice 1970.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АУСТЕНИТОВО-ФЕРРИТНОЙ  
МАРГАНЦОВО-АЛЮМИНИЕВОЙ СТАЛИ

Р е з ю м е

Целью проведенных исследований было определение влияния химического состава на структуру и свойства высокомарганцевой стали. Установлено, что оптимальным комплексом механических свойств характеризуется сталь с двухфазной структурой, состоящей из аустенитовой основы, упрочненной узкими параллельными строчками феррита.

Представлены основные механические свойства, а также характеристика стали 60G30J9 после горячей прокатки и обжатия. Сталь 60G30J9 характеризуется большой склонностью к укреплению за счёт холодной деформации.

THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AUSTENITIC-FERRITIC  
MANGANESE-ALUMINIUM STEELS

S u m m a r y

The research was aiming at the determination of influence of chemical constitution upon the structure and properties of high-manganese steel. The duplex structure steel consisting of the austenitic matrix strengthened by two narrow parallel ferrite bands was stated to have the optimum set of mechanical properties.

The basic mechanical properties as well as the characteristics of 60G30J9 steel after hot rolling and after draft were presented. 60G30J9 steel showed reasonable tendency towards hardening after cold straining.