ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1973

Seria: MECHANIKA z. 51 Nr kol. 388

Łucja Cieślak, Elżbieta Kalinowska,
Wojciech Ozgowicz

Instytut Metaloznawstwa i Spawalnictwa

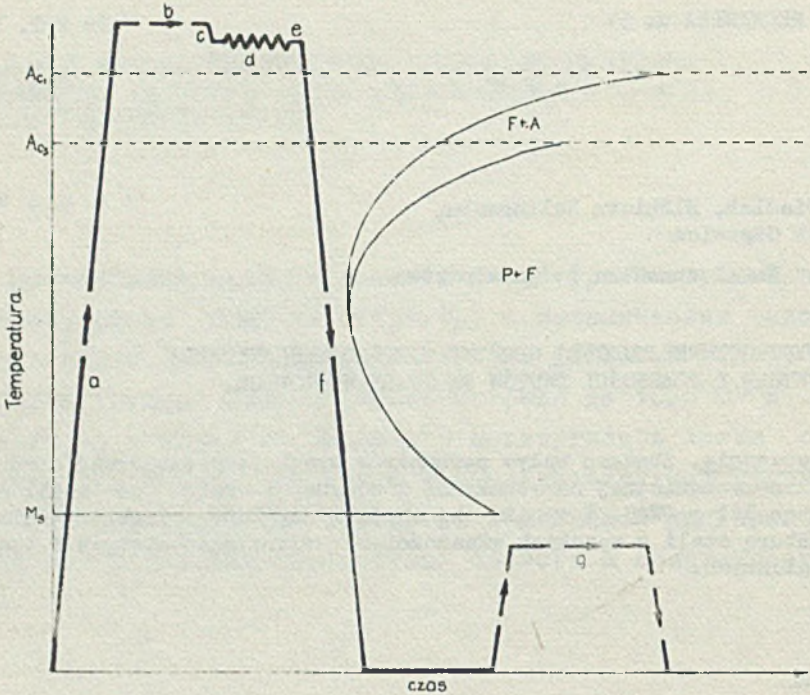
WPŁYW WYSOKOTEMPERATUROWEJ OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ NA STRUKTURĘ I WŁASNOŚCI DRUTÓW ZE STALI WĘGLOWYCH

Streszczenie. Zbadano wpływ parametrów wysokotemperaturowej obróbki cieplno-mechanicznej na strukturę i własności drutów ze stali węglowych St1 i DW45. W wyniku tej obróbki uzyskano drobnoziarnistą strukturę stali o wysokich własnościach wytrzymałościowych i technologicznych.

1. Wstęp

Obróbka cieplno-mechaniczna jest jedną z metod zapewniającą uzyskanie wysokowytrzymałościowych materiałów. Najbardziej rozpowszechnionym wariantem tej obróbki jest wysokotemperaturowa obróbka cieplno-mechaniczna (wocm). Znajduje ona zastosowanie przede wszystkim do stali konstrukcyjnych węglowych, niskostopowych i średniostopowych, przy czym stosowany stopień gniotu wynosi ok. 25-60%. Przeprowadzone badania [1-5] wykazały, że w wyniku tej obróbki możliwe jest jednoczesne polepszenie własności wytrzymałościowych i plastycznych. Oprócz własności mechanicznych uzyskuje się polepszenie wytrzymałości zmęczeniowej, żarowytrzymałości, odporności na ścieranie, a nawet odporności na korozję.

WOCM jest połączeniem kilku zabiegów obróbki cieplnej i odkształcenia plastycznego w zakresie austenitu stabilnego (rys. 1). Odkształcenie plastyczne powinno być tak prowadzone, aby stłumiony został proces rekrystalizacji statycznej austenitu stabilnego, a powstała po chłodzeniu struktura charakteryzowała się dużą gęstością dyslokacji i znaczną stabilnością w zakresie temperatur odpuszczania [1].



Rys. 1. Schemat wysokotemperaturowej obróbki cieplno-mechanicznej
a - nagrzewanie, b - ujednorodnienie austenitu, c - chłodzenie do temperatury odkształcenia, d - odkształcenie, plastyczne, e - wytrzymanie izotermiczne, f - hartowanie, g - odpuszczanie

Własności mechaniczne stali poddawanych wocm zależą od składu chemicznego, temperatury odkształcenia plastycznego, stopnia gniotu i warunków odpuszczania.

Badania wpływu składu chemicznego na umocnienie stali wskazują na konieczność pewnej minimalnej zawartości węgla, niezbędnej dla uzyskania maksymalnego efektu umocnienia przez zgniot austenitu, który występuje przy stężeniu ok. 0,4-0,5% węgla. Poniżej tej zawartości wytrzymałość rośnie proporcjonalnie do zawartości węgla, natomiast powyżej, obserwuje się intensywne wydzielanie węglików w obszarach zdefektowanych i zjawiska kruchości [6]. Wpływ zawartości węgla na własności plastyczne zależy od udziału składników stopowych, hamujących zjawisko rekrystalizacji odkształconego austenitu [7].

Temperatura odkształcenia plastycznego wpływa głównie na proces rekrystalizacji odkształconego austenitu. Wysoka temperatura przyspiesza ten proces na skutek małej stabilności struktury o dużej gęstości defektów. Powoduje to obniżenie własności wytrzymałościowych i wzrost własności plastycznych stali. Obniżenie temperatury odkształcenia plastycznego do temperatur bliskich przemianie $\gamma \rightarrow \alpha$ powoduje wyraźny wzrost własności wytrzymałościowych [1,8].

Stopień gniotu wywiera decydujący wpływ na umocnienie stali w procesie wocm. Z danych [9÷11] wynika, że efekt umocnienia wzrasta ze zwiększeniem stopnia gniotu. Sposób odkształcenia plastycznego ma wpływ na anizotropię własności mechanicznych i powinien uwzględniać szybkość odkształcenia. Opinie autorów odnośnie tego czynnika są jeszcze podzielone [12, 13]. Zwraca się uwagę na różnice w wartości energii zmagazynowanej podczas odkształcenia plastycznego przy statycznym i dynamicznym sposobie gniotu. W pracach [3, 10] wykazano, że o wielkości umocnienia decyduje nie tylko wartość sumarycznego odkształcenia, lecz również wielokrotność przejść stosowanych w procesie odkształcenia. Zwiększenie ilości przejść sprzyja wyraźnie podwyższeniu własności wytrzymałościowych przy jednoczesnej poprawie własności plastycznych. Tłumaczy się to bardziej równomiernym odkształceniem stali, które powoduje równomierny rozkład defektów w odkształconym materiale. Ze wzrostem stopnia odkształcenia struktura stali staje się bardziej zdefektowana. Rośnie gęstość dyslokacji i rozdrobnienie ziarn, a tym samym zwiększa się powierzchnia granic co powoduje w wysokiej temperaturze odkształcenia wzrost ilości zarodków przyspieszających proces wydzielania. Wzrasta również szybkość rekrystalizacji. Zwiększenie ilości defektów struktury intensyfikuje wydzielenie węglików [14-16].

Wpływ odpuszczania na własności stali i strukturę po wocm wykazuje duże podobieństwo do konwencjonalnej obróbki cieplnej. W pracy [17] dotyczącej odpuszczania stali węglowej wykazano, że dla zawartości węgla powyżej 0,4% w temperaturach 200÷400°C istnieją trzy fazy węglikowe: δ- Fe_xC; $\varkappa$- Fe_xC i Fe_3C. Według Winchella i Cohena [18] w stalach nisko i średniowęglowych własności zdeterminowane są procesem odpuszczania, którego efektywność zależy głównie od reakcji między a-

tomami węgla, dyslokacjami i koherentnymi węglikami. W ogólnym przypadku po wocm uzyskuje się znacznie wyższą wytrzymałość i plastyczność w porównaniu z konwencjonalną obróbką cieplną. Własności te zachowują się trwale do temperatur odpuszczania ok. 500°C [1].

Kilka prac [19÷23] z zakresu obróbki cieplno-mechanicznej dotyczy zastosowania różnych wariantów tej metody w produkcji drutów stalowych. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono zgodnie poprawę własności wytrzymałościowych. Brak jest natomiast dokładnych informacji dotyczących własności plastycznych i technologicznych obrabianych drutów.

Celem pracy jest optymalizacja czynników wpływających na własności mechaniczne i strukturę stali węglowych poddanych wocm oraz określenie przydatności tej technologii w zastosowaniu do ciągnienia drutów.

2. Badania własne

2.1. Materiał do badań i obróbka cieplno-mechaniczna

Badania przeprowadzono na drutach o średnicy 1,2 mm wykonanych ze stali St1 i DW45 w stanie normalizowanym i zgniecionym o składach chemicznych podanych w tablicy 1 i własnościach mechanicznych zestawionych w tablicy 2.

Tablica 1

Skład chemiczny badanych stali

Gatunek stali	Skład chemiczny w %						
	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni
St1	0,11	0,37	0,05	0,04	0,05	-	-
DW45	0,42	0,45	0,19	0,010	0,018	0,05	0,06

Tablica 2

Własności mechaniczne drutów użytych do badań

Gat. stali	Stan dostarczenia	Własności mechaniczne					
		Rm [N/mx10^3]	$Re_{0,2}$ [N/mx10^7]	A [%]	Z [%]	i_s	i_p
St1	normalizowany	46,0	34,5	24,6	64,7	105	22
	zgnieciony	85,7	79,4	2,1	37,1	27	12
DW45	normalizowany	74,5	49,4	24,4	52,6	56	19
	zgnieciony	93,9	79,6	2,8	54,2	46	14

Wysokotemperaturową obróbkę cieplno-mechaniczną realizowano przy zachowaniu następujących parametrów:

- nagrzewanie indukcyjne z prędkością około 1100°C/sek do temperatur austenityzacji 850°C i 950°C odpowiednio dla stali DW45 i St1;
- odkształcenie plastyczne w zakresie austenitu stabilnego przy użyciu ciągadeł zapewniających gnioty od 5 do 25%;
- oziębianie w wodzie;
- odpuszczanie indukcyjne dla stali DW45 w temperaturach 350°C, 450°C, i 550°C z szybkością grzania w zakresie 600-1000°C/sek.

Proces odkształcenia plastycznego podczas wocm przeprowadzono na przeciągarce do drutów o regulowanej prędkości ciągnienia w zakresie 9-19 cm/sek. Przeciąganie wykonano jako zabieg jednokrotny stosując przeciągadła z węglików spiekanych o kątach roboczych stożka zgniatającego $2\alpha = 15°$. Dla polepszenia warunków przeciągania drut smarowano mieszaniną zasadowego fosforanu sodu lub potasu z dwusiarczkiem molibdenu, względnie grafitu koloidalnego.

Nagrzewanie do hartowania i odpuszczania przeprowadzono metodą indukcyjną przy użyciu generatora typu GIK-1 o częstotliwości 1,8 ± 0,2 MHz i regulowanej mocy wyjściowej 1 kW. Parametry nagrzewania ustalono na podstawie wstępnych prób, stosując wzbudniki dwuwarstwowe o indukcyjności w zakresie 0,57÷0,69 [μH]. Pomiaru temperatury austenityzacji

dokonano pirometrem optycznym typu "Pyrolux" prod. NRD z dokładnością ± 5°C. Temperaturę odpuszczania określono wstępnie przy użyciu termokolorów firmy A.W. Faber - Austria z dokładnością ± 50°C. Dokładniejszy pomiar temperatury zapewnił przyrząd z termoelementem Cu-Konstantan o średnicy przewodu 0,2 mm.

Dla porównania wpływu odkształcenia plastycznego podczas wocm na strukturę i własności badanych stali przeprowadzono odkształcenie plastyczne drutu przez przeciąganie w temperaturze pokojowej. Zastosowano ten sam zakres gniotów i identyczne przeciągadła jak podczas wocm. Do smarowania drutu użyto wodnego roztworu mydła sodowego.

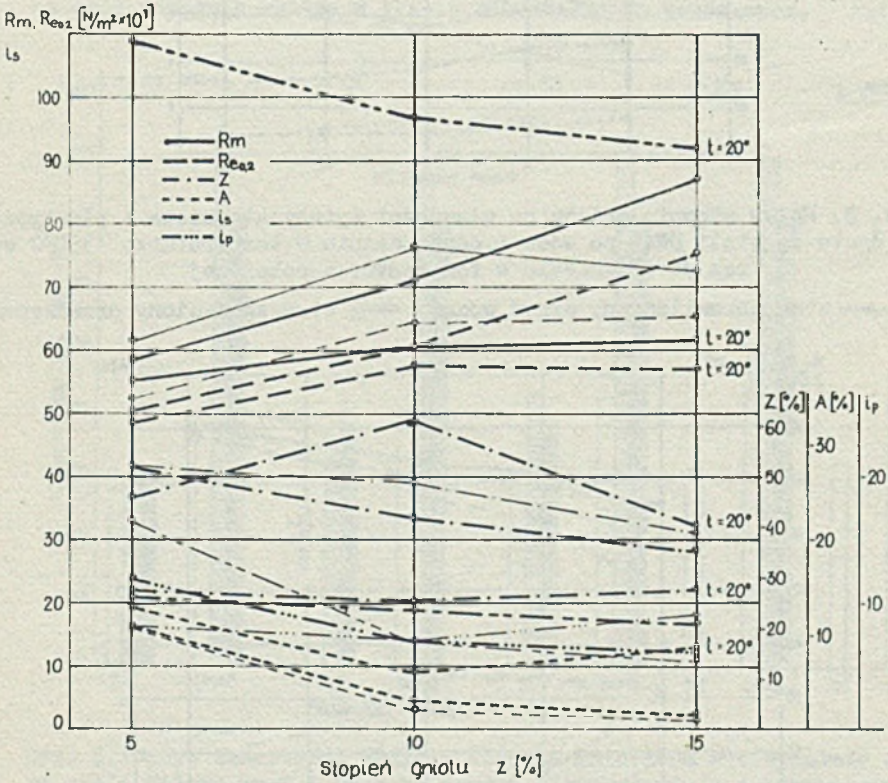
2.2. Przebieg badań

W celu określenia wpływu wocm na strukturę i własności mechaniczne badanych stali przeprowadzono:

- próby rozciągania - na maszynie wytrzymałościowej firmy "Instron" o maksymalnej sile zrywającej 1962 [N] i prędkości rozciągania 0,005 m/sek.
- próby technologiczne przeginania - na przeginarce firmy "Amsler" zgodnie z normą PN-57/M-80002.
- próby technologiczne skręcania - na skręcarce poziomej typu K2 prod. ZSSR zgodnie z normą PN-66/M-80003.
- próby twardości - na twardościomierzu firmy Hauser metodą Vickersa przy obciążeniu 98,1 [N].
- badania metalograficzne - na mikroskopie świetlnym firmy Reichert przy powiększeniu 500 x na zgładach wzdłużnych trawionych Nitalem.
- rentgenowską analizę fazową - metodą Debye'a - Scherrera przy zastosowaniu kamery o średnicy 57,3 mm wykorzystując filtrowane promieniowanie lampy z anodą żelazną.

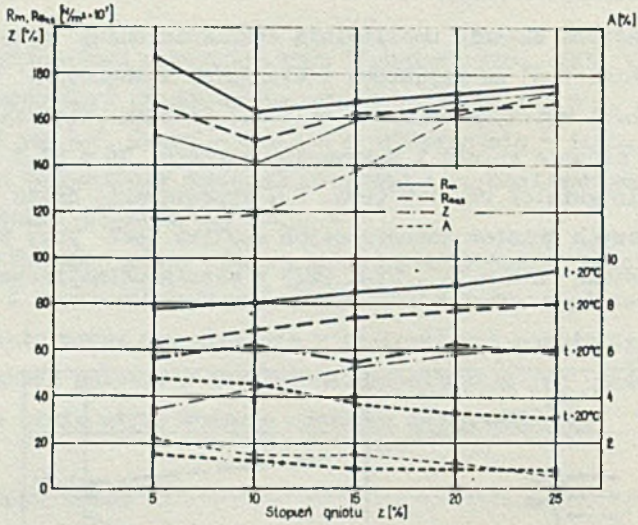
3. Wyniki badań i dyskusja

Przeprowadzone badania umożliwiają dokonanie oceny wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na strukturę i własności mechaniczne stali St1 i DW45. Własności wytrzymałościowe stali St1 po wocm zwiększają się wraz ze wzrostem stopnia gniotu i maksymalna wartość Rm = 87,3 x 10^7 (N/m^2) występuje dla gniotów ok. 15% (rys. 2). Przeciąganie drutu z zastosowaniem większych gniotów jednorazowych możliwe jest przy zastosowaniu ciągadeł o kącie 2 α = 15°. Stal DW45 w stanie normalizowanym wykazu-



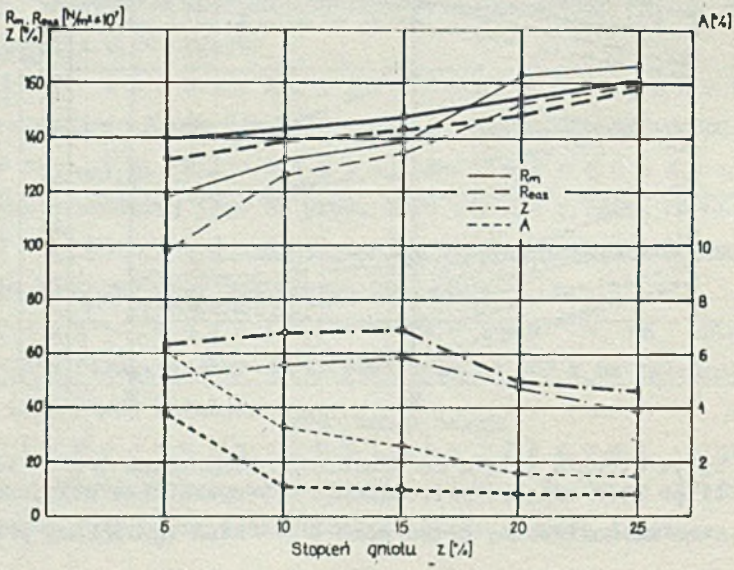
Rys. 2. Wpływ stopnia gniotu na własności mechaniczne drutu ze stali St1 po wocm oraz po przeciąganiu w temperaturze pokojowej

---- stan normalizowany przed wocm —— stan zgnieciony przed wocm



Rys. 3. Wpływ stopnia gniotu na własności wytrzymałościowe i plastyczne drutu ze stali DW45 po wocm i odpuszczaniu w temperaturze 350°C oraz po ciągnieniu w temperaturze pokojowej

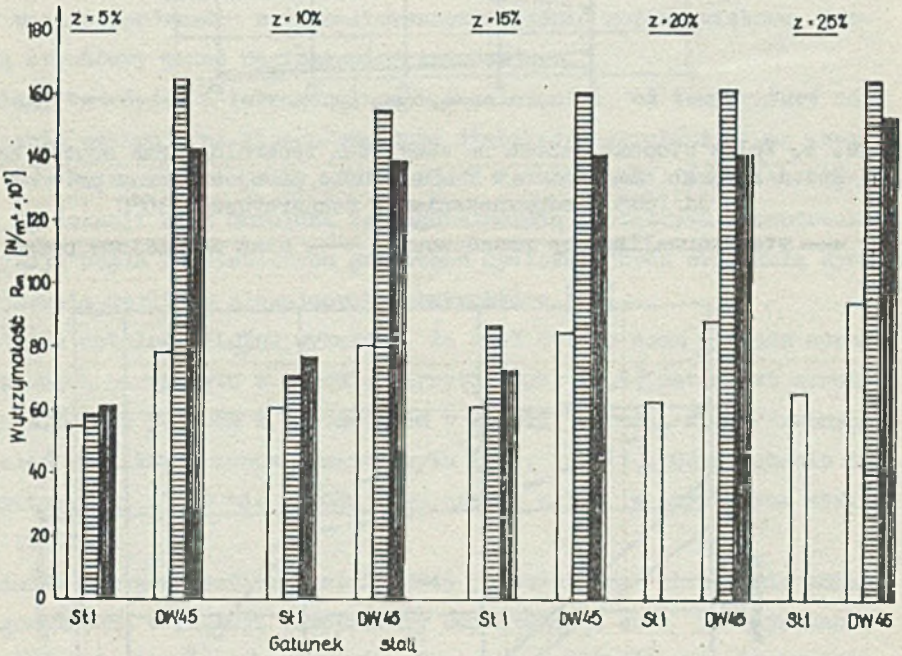
—— stan normalizowany przed wocm —— stan zgnieciony przed wocm



Rys. 4. Zależność własności wytrzymałościowych i plastycznych od stopnia gniotu dla drutu ze stali DW45 po wocm i odpuszczaniu w temperaturze 550°C

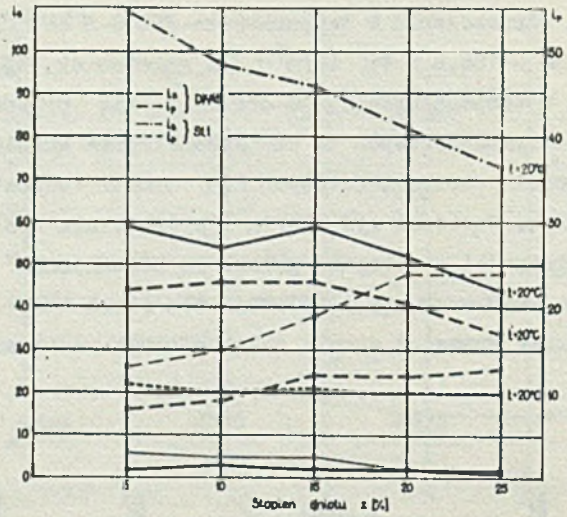
—— stan normalizowany przed wocm —— stan zgnieciony przed wocm

je po wocm i odpuszczaniu w temperaturze 350°C i 450°C najwyższą wytrzymałość Rm = 186,6 x 10^7 (N/m^2) dla gniotów ok. 5%, natomiast po odpuszczaniu w temperaturze 550°C obserwuje się proporcjonalny wzrost własności wytrzymałościowych ze wzrostem stopnia gniotu (rys. 3-5). Zmiany własności wytrzymałościowych dla stanu < odkształconego przed wocm są podobne. Wartości wydłużenia i przewężenia po przeprowadzonej obróbce w zależności od stopnia gniotu są nieznacznie niższe niż po przeciąganiu w temperaturze pokojowej. Dla stali DW45 wielkości te są na ogół znacznie wyższe w stanie odkształconym przed wocm, natomiast



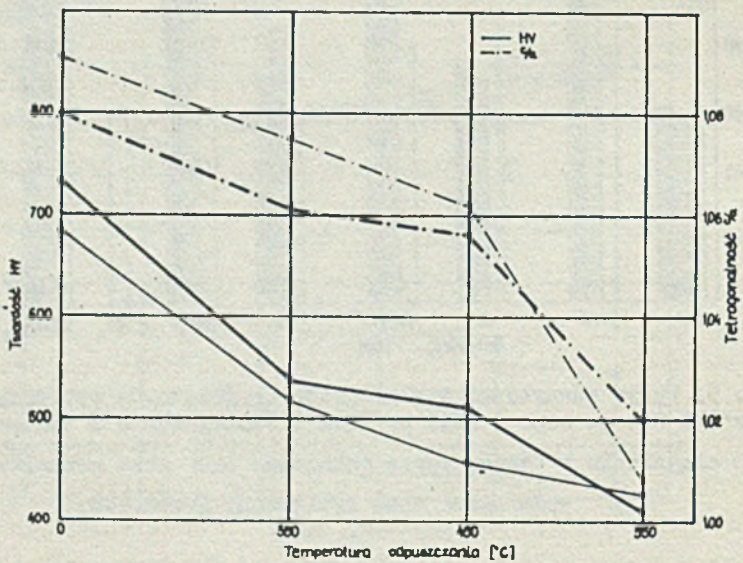
Rys. 5. Wpływ zawartości węgla i stopnia gniotu na wytrzymałość drutów ze stali St1 po wocm i DW45 po wocm i odpuszczaniu w temperaturze 450°C
▭ ciągnienie w temperaturze pokojowej ▤ stan normalizowany przed wocm ▥ stan zgnieciony przed wocm

dla stali St1 - w stanie normalizowanym. Po wocm obserwuje się obniżenie liczby skręceń, natomiast liczba przegięć drutów ze stali DW45 po odpuszczaniu w temperaturze 450°C dla stanu zgniecionego przed wocm jest wyższa niż po przeciąganiu w temperaturze pokojowej (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ stopnia gniotu na własności technologiczne drutów ze stali St1 i DW45 po ciągnieniu w temperaturze pokojowej oraz po wocm stali DW45 z odpuszczaniem w temperaturze 450°C

—— stan normalizowany przed wocm —— stan zgniecony przed wocm



Rys. 7. Wpływ temperatury odpuszczania na twardość i tetragonalność drutu ze stali DW45 po wocm

—— stan normalizowany przed wocm —— stan zgniecony przed wocm

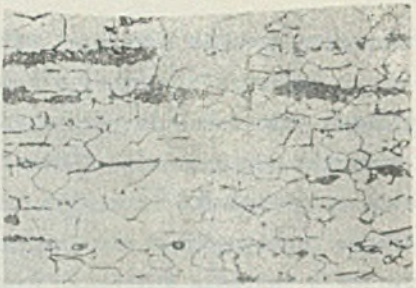
Stosunkowo wysokie własności wytrzymałościowe uzyskane po wocm związane są ze zmianami struktury w procesie dynamicznego nagrzewania indukcyjnego, odkształcenia plastycznego w zakresie austenitu stabilnego oraz w wyniku odpuszczania. Podwyższenie granicy plastyczności wraz ze wzrostem wytrzymałości tłumaczyć można rozdrobnieniem struktury i prawdopodobnie zmniejszeniem mikronaprężeń. Wskazuje to, że odkształcenie plastyczne w zakresie austenitu stabilnego prowadzone jest w warunkach przy których równocześnie ze zwiększeniem gęstości dyslokacji zmienia się ich dystrybucja na charakterystyczną dla początkowych stadiów rekrystalizacji. Wyższe własności plastyczne dla stanu odkształconego przed wocm w porównaniu z normalizowanym wyjaśnić można większą dyspersją struktury przed nagrzewaniem indukcyjnym.

Zmiany twardości i tetragonalności w zależności od temperatury odpuszczania wskazują na stosunkowo dużą stabilność struktury po wocm (rys. 7). Potwierdza to fakt, że twardość ta związana jest z konfiguracją dyslokacji oraz mniejszą tetragonalnością martenzytu spowodowaną segregacją węgla na stabilnych granicach dyslokacyjnych oraz dużą dyspersyjnością węglików blokujących substrukturę [17].

Badania metalograficzne wykazały, że stal St1 po wocm posiada strukturę pasmową martenzytu w osnowie ferrytu (rys. 8, 9),natomiast struktura stali DW45 po wocm z hartowaniem w wodzie, składa się z drobnych wydzieleń węglików w osnowie martenzytu (rys. 10, 11). Odpuszczanie do temperatury ok. 450°C nie powoduje wyraźnych zmian w strukturze stali (rys. 12, 13).

Badania rentgenograficzne stali DW45 pozwoliły na określenie zmian tetragonalności w funkcji temperatury odpuszczania oraz identyfikację składników struktury po hartowaniu. Rentgenogram stali po hartowaniu bez odkształcenia w zakresie austenitu stabilnego ujawnił rozmyte prążki interferencyjne Feα (rys. 14). Natomiast po tym samym zabiegu z 15% stopniem gniotu stwierdzono oprócz prążków Feα, prążki pochodzące od cementytu (rys. 15). Występowanie prążków interferencyjnych cementytu mogłoby potwierdzać wydzielanie węgla w procesie odkształcenia plastycznego podczas wocm, sugerowane w pracach [15-17]. Badania rent-

Rys. 8

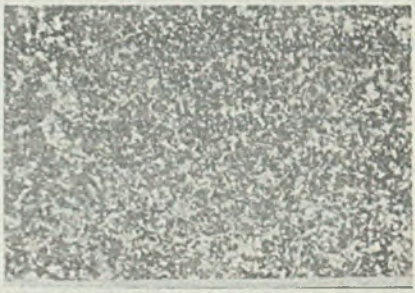


Rys. 9

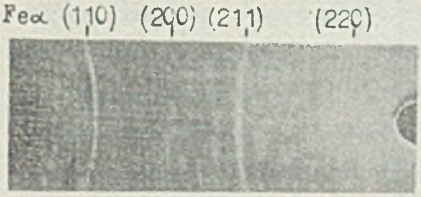
Rys. 10

Rys. 11

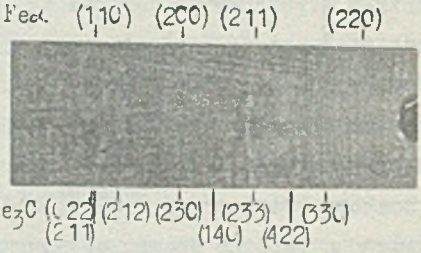
Rys. 12



Rys. 13



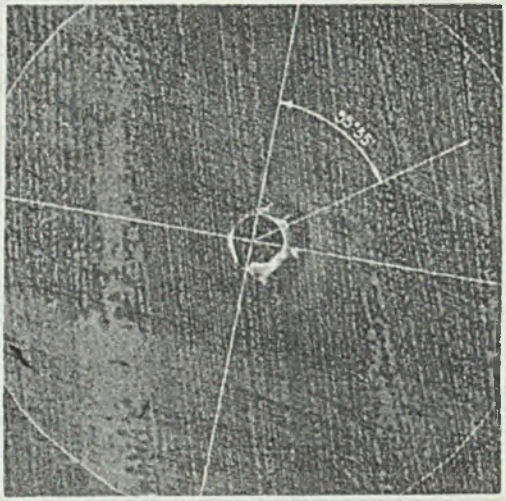
Rys. 14



Rys. 15

Nr rys.	Gat. stali	Stan wyjściowy	Rodzaj obróbki	Struktura	Pow. x
8	St1	normalizowany	wocm: gniot 10% hart. 950°C/woda	Martenzyt w osnowie ferrytu	500
9	St1	zgnieciony gniot 97%	wocm: gniot 10% hart. 950°C/woda	Martenzyt w osnowie ferrytycznej	500
10	DW45	normalizowany	wocm: gniot 15% hart. 850°C/woda	Dyspersyjne węgliki w osnowie martenzytycznej	500
11	DW45	zgnieciony gniot 20%	wocm: gniot 15% hart. 850°C/woda	Dyspersyjne węgliki w osnowie martenzytu	500
12	DW45	normalizowany	wocm: gniot 15% hart. 850°C/woda odpuszcz. 450°C/powietrze	Martenzyt odpuszczony z drobnymi wydzieleniami cementytu	500
13	DW45	zgnieciony gniot 20%	wocm: gniot 15% hart. 850°C/woda odpuszcz. 450°C/powietrze	Dyspersyjne wydzielenia cementytu w osnowie martenzytu odpuszczonego	500
14	DW45	normalizowany	wocm: gniot 0% hart.850°C/woda	Rentgenogram wykonany metodą Debyea Scherrera. Prążki interferencyjne od płaszczyzn ferrytu	500
15	DW45	normalizowany	wocm: gniot 15% hart. 850°C/woda	Rentgenogram wykonany metodą Debyea Scherrera. Prążki interferencyjne od płaszczyzn ferrytu i cementytu	500

genograficzne pozwoliły na określenie tekstury włóknistej ferrytu [110] w drutach ze stali DW45 po wocm (rys. 16).



Rys. 16. Tekstura włóknista ferrytu typu 110 w stali DW45 po wocm: gniot 15%, temp. odpuszczania 450°C

Wyniki badań wskazują, że rozdrobnienie struktury i podwyższenie wytrzymałości stali w wyniku wocm nie może być wiązane z decydującym oddziaływaniem poszczególnych czynników wpływających na umocnienie stali, ponieważ proces ten ma charakter kompleksowy. Przeprowadzone badania wskazują, że dynamiczne nagrzewanie indukcyjne ma perspektywy zastosowania w ciągarstwie ze względu na znaczne skrócenie czasu trwania zabiegów w procesie ciągnienia drutów.

4. Wnioski

1. Własności wytrzymałościowe i technologiczne drutu ze stali St1 i DW45 po wocm zależą głównie od zawartości węgla, stopnia gniotu w zakresie austenitu stabilnego i temperatury odpuszczania, warunkujących rozdrobnienie struktury, wydzielanie cementytu i występowanie tekstury.

2. Optymalny stopień gniotu dla stali St1 podczas wocm wynosi ok. 15% i zapewnia wytrzymałość Rm = 87,3 x 10^7 $[N/m^2]$, natomiast dla stali DW45 maksymalna wytrzymałość występuje przy gniocie 5% i wynosi Rm = 186,6 x 10^7 $[N/m^2]$.
3. WOCM powoduje podwyższenie własności wytrzymałościowych przy nieznacznym obniżeniu własności plastycznych i technologicznych w porównaniu z analogicznymi własnościami po przeciąganiu drutu w temperaturze pokojowej.
4. Wysokie własności wytrzymałościowe przy zadowalającej plastyczności i znaczne skrócenie czasu nagrzewania umożliwia zastosowanie wocm w procesie technologicznym wytwarzania drutu.

LITERATURA

1. M. Bernsztejn: Tiermomiechaniczeskaja obrabotka mietałłow i spławow, Moskwa 1968.
2. A. Gulajew: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 11, 1965, 9.
3. A. Prokoszkin: Mietałły, 2, 1970, 72.
4. L. Berkowski: Obróbka plastyczna, 9, 4, 1970, 481.
5. A. Piński: Biuletyn IMP, 2, 1971, 2.
6. L. Raymond: J. Iron Steel Inst., 203, 9, 1965, 933.
7. B. Kula, S. Radkliffe: Termomechanical treatment of steel, 15, 10, 1963.
8. I. Sukiurov: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 9,1966, 48.
9. R. Grange, B. Mithell: Metals Eng. Quart., 1, 1961, 41.
10. S. Iwanowa, K. Gordienko: Nowyje puti powyższenija procznosti mietałłow, Moskwa 1964.
11. G. Rassman, P. Möller: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 20, 1967, 30.
12. A. Hopkins, J. Ray: Metal Treatment and Drop Forging, 1, 1963.
13. W. Duckworth: J. Iron and Steel Inst., 202, 4, 1964.
14. J. Irani, P. Taylor: J. Iron and Steel Inst., 7, 1968, 83.
15. M. Bersztejn: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 12, 1969, 34.

16. W. Pridancew: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 9, 1970, 64
17. J. Kagan: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 2, 1964, 29.
18. G. Winchell, M. Cohen: TASM, 55, 1962, 347.
19. V. Zubow: Mietałłowied. i tierm. obrab. mietałłow, 1, 1962, 20.
20. A. Hopkins, M. Ray: Metal Treatment a. Drop. Forg., 31, 1964, 177.
21. M. Armstrong: Draht-Welt 51, 1965, 8.
22. N. Kidin: Czorn. Mietałł., 3, 1971, 129.
23. H. Büchler, K. Rittmann: Draht, 21, 3, 1970, 131.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Р е з ю м е

Исследовано влияние параметров высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и свойства проволоки стали St1 и DW45. После этой обработки получено мелкую структуру стали о высоких прочностных и технологических свойствах.

INFLUENCE OF THE HIGH TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON STEEL WIRES

S u m m a r y

The effect of the parameters of high temperature thermomechanical treatment on the structure and mechanical properties of carbon steel wires types St1 i DW45 have been investigated. After high temperature thermomechanical treatment fine grained structure of steel and good mechanical and technological properties were obtained.