

Lucja Cieślak, Elżbieta Kalinowska,
Wojciech Ozgowicz

Instytut Metaloznawstwa i Spawalnictwa
Politechniki Śląskiej

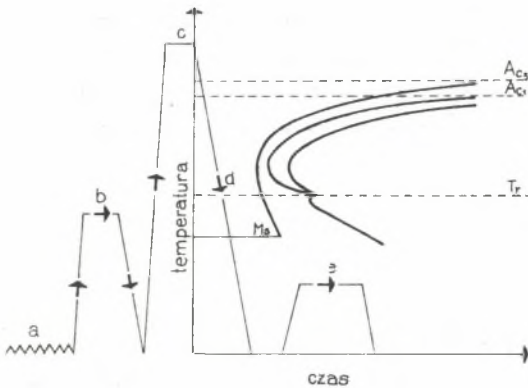
STRUKTURA I WŁASNOŚCI MECHANICZNE DRUTU ZE STALI DW45
OBROBIONEGO CIEPLNO-MECHANICZNIE

Streszczenie. Zbadano wpływ warunków obróbki cieplno-mechanicznej z odkształceniem w temperaturze pokojowej na strukturę i własności mechaniczne drutu ze stali DW45. Po tej obróbce stal osiąga drobnoziarnistą strukturę martenzytu odpuszczonego, zapewniającą wysokie własności wytrzymałościowe i technologiczne drutu.

Wstęp

Obróbka cieplno-mechaniczna jest efektywną metodą zapewniającą uzyskanie wysokowytrzymałościowych materiałów. Jednym z wariantów tej metody jest obróbka cieplno-mechaniczna, w której odkształcenie plastyczne poprzedzające obróbkę cieplną przeprowadza się w temperaturze pokojowej. Procesy odkształcenia plastycznego i obróbki cieplnej mogą być realizowane zupełnie niezależnie, co zapewnia wysoką technologiczność tej metody w zastosowaniu przemysłowym.

Omawiany wariant obróbki cieplno-mechanicznej jest połączeniem kilku zabiegów odkształcenia plastycznego i obróbki cieplnej (rys. 1). W odróżnieniu od innych wariantów tej metody z odkształceniem poprzedzającym zabiegi obróbki cieplnej jak np. marforming, gdzie odkształceniu podlegają stale o strukturze martenzytycznej, w przedstawionej metodzie



Rys. 1. Schemat obróbki cieplno-mechanicznej
a - odkształcenie plastyczne w temperaturze pokojowej, b - zdrowienie międzyoperacyjne, c - austenitacja, d - hartowanie, e - odpuszczanie

- odkształceni poddaje się stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub sorbitycznej, o różnym stopniu dyspersyjności węglików. Obróbka cieplna prowadzona po odkształceni plastycznym ma na celu zachowanie i optymalne zmodyfikowanie zmian strukturalnych, powstałych podczas procesu odkształcenia. W zasadniczym schemacie rozważanej obróbki występuje ponadto niskotemperaturowe wyżarzanie (zdrowienie), warunkujące zachowanie zmian strukturalnych po kolejnych przemianach $\alpha \rightarrow \delta \rightarrow \alpha$ (M). Przeprowadzone badania wstępne [1-4] dotyczyły czynników, wpływających na efekt obróbki cieplno-mechanicznej, takich jak: struktura wyjściowa, temperatura wyżarzania poprzedzającego austenityzację, temperatura i czas austenityzacji, stopień odkształcenia i temperatura odpuszczania. W wyniku tych badań wykazano, że omawiana obróbka cieplno-mechaniczna powoduje addytywny wzrost umocnienia wywołanego odkształceni plastycznym i przemianą martenzytyczną. Oprócz polepszenia własności wytrzymałościowych uzyskano wyraźną poprawę własności plastycznych [5, 6].

Na podstawie tych prac można sądzić, że występujące podczas tej obróbki rozdrobnienie ziarn austenitu wpływa na podwyższenie własności mechanicznych stali tylko w przypadku, gdy jest ono poprzedzone wstępnym odkształceni plastycznym oraz, że niskotemperaturowe wyżarzanie powoduje dodatkowy przyrost umocnienia bez zmiany pierwotnej wielkości ziarn austenitu [6]. Jakkolwiek wskazuje to, że podwyższenie granicy plastyczności i wytrzymałości konstrukcyjnej stali w wyniku zastosowanej obróbki cieplno-mechanicznej nie zależy od rozdrobnienia ziarn austenitu, to przyjmuje się, że opinia ta wymaga dodatkowych wyjaśnień i potwierdzenia wynikami badań [7].

Podjęte badania miały na celu ustalenie optymalnych warunków omawianej obróbki cieplno-mechanicznej, zapewniających polepszenie własności mechanicznych drutów ze stali konstrukcyjnej węglowej DW45 oraz określenie przydatności tej metody w technologicznym procesie wytwarzania wysokowytrzymałościowych drutów stalowych.

Badania własne

Materiał do badań i obróbka cieplno-mechaniczna

Badania przeprowadzono na drutach o średnicach 1,38; 1,60 i 3,14 mm, pochodzących z wytopu przemysłowego stali konstrukcyjnej węglowej DW45 w stanie normalizowanym, o składzie chemicznym podanym w tablicy 1 i następujących własnościach mechanicznych: $R_m = 772$, MN/m^2 , $R_{0,2} = 467$ MN/m^2 , $A_{100} = 21\%$, $Z = 37,5\%$, $i_s = 48$, $i_p = 14$.

Tablica 1

Skład chemiczny badanej stali

Gatunek stali	Skład chemiczny w %							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
DW45 PN-65/H-84028	0,44	0,44	0,22	0,016	0,024	0,07	0,05	0,05

Stała średnica drutu po przeciąganiu w temperaturze pokojowej równa 1,2 mm zapewniła porównywalne warunki przeprowadzenia dalszych zabiegów obróbki cieplnej oraz badań własności wytrzymałościowych i technologicznych.

Proces obróbki cieplno-mechanicznej obejmował następujące zabiegi:

- przeciąganie drutu w temperaturze pokojowej z sumarycznym stopniem gniotu 25, 50 i 98%;
- wyżarzanie międzyoperacyjne drutu w temperaturach 250, 350 i 450°C metodą indukcyjną z szybkością ok. 600°C/sek;
- nagrzewanie indukcyjne do temperatury austenitizacji 850°C z szybkością ok. 1100°C/sek;
- oziębienie drutu w wodzie oraz
- odpuszczanie w temperaturze 300°C z zastosowaniem nagrzewania indukcyjnego z szybkością grzania ok. 600°C/sek.

Przeciąganie drutu realizowano na przeciągarce o regulowanej prędkości ciągnięcia w zakresie 9÷18 cm/sek, stosując ciągnadła z węglików spiekanych o kącie $2\alpha = 15^\circ$. Drut smarowano roztworem wodnym mydła sodowego.

Nagrzewanie do temperatury austenitizacji wykonano metodą indukcyjną przy użyciu generatora typu GIK-1 o częstotliwości 1,8 MHz i regulowanej mocy wyjściowej w zakresie do 1 kW. Parametry nagrzewania ustalono na podstawie wstępnych prób stosując wzbudnik dwuwarstwowy, zapewniający optymalne warunki nagrzewania o indukcyjności $0,57 \div 0,69 \mu\text{H}$. Nagrzewanie do temperatury wyżarzania i odpuszczania prowadzono metodą indukcyjną przy zastosowaniu generatora GIS-10 o częstotliwości 406,8 kHz i mocy wyjściowej 10 kW. Do nagrzewania stosowano odpowiednio skonstruowane wzbudniki jednowarstwowe o indukcyjności 0,12 i 0,17 μH .

Pomiar temperatury zabiegów obróbki cieplnej przeprowadzono przy użyciu urządzenia termowizyjnego systemu 680/102B produkcji firmy AGA.

Przebieg badań

W celu określenia wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na strukturę i własności badanej stali przeprowadzono:

- p r ó b y r o z c i ą g a n i a - na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron, przy nastawieniu siłomierza na 4962 N i stosowaniu prędkości rozciągania 0,05 m/sek;
- p r ó b y t e c h n o l o g i c z n e p r z e g i n a n i a na przeginarce firmy Amsler zgodnie z normą PN-67/M-80002;
- p r ó b y t e c h n o l o g i c z n e s k r ę c a n i a - na skręcarce poziomej, zgodnie z normą PN-66/M-80003;
- p o m i a r y t w a r d o ś c i - na twardościomierzu firmy Hauser metodą Vickersa przy obciążeniu 98,1 N;
- b a d a n i a m e t a l o g r a f i c z n e - na mikroskopie świetlnym firmy Reichert przy powiększeniu 500 x na zglądach wzdluznych trawionych nitalem;
- b a d a n i a s t r u k t u r y c i e n k i c h f o l i i - na mikroskopie elektronowym JEM 200A firmy JEOL. Folie z drutów o wymiarach ϕ 1,2 x 15 mm wykonano przez wstępne ścienianie mechaniczne na papierach ściernych, a następnie polerowanie elektrochemiczne w odczynniku zawierającym 200 ml kwasu fosforowego, 50 g dwutlenku chromu przy napięciu 8 V i natężeniu prądu 0,7 mA.

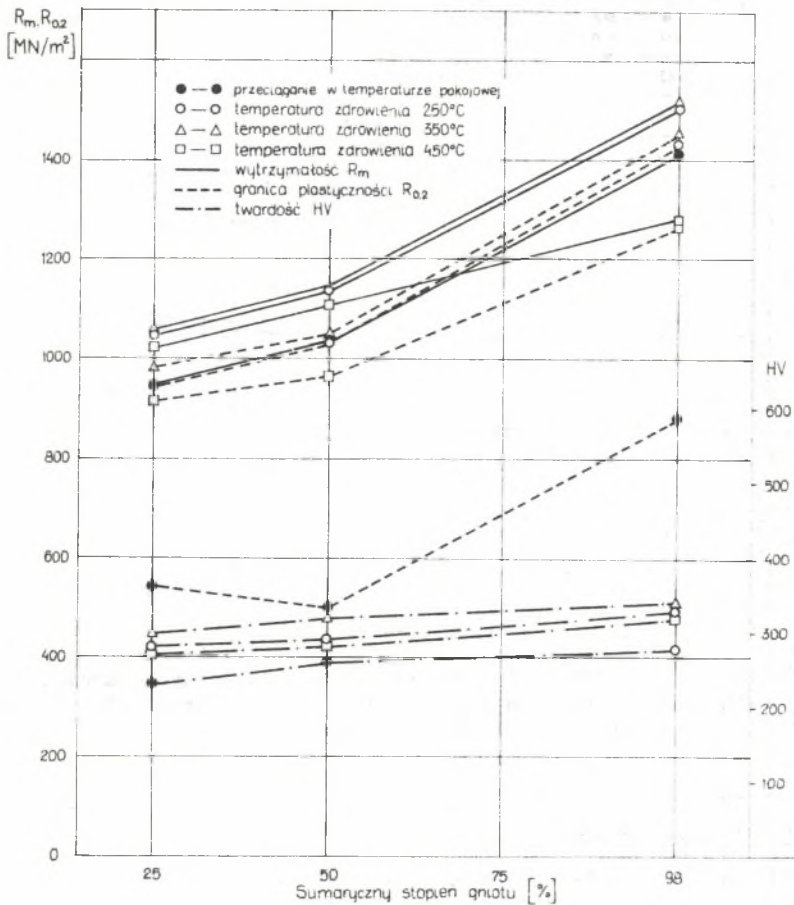
Analizę wyników własności mechanicznych prowadzono dla wartości średnich, wyznaczonych z pięciu pomiarów dla każdej próbki.

Wyniki badań i ich dyskusja

Przeprowadzone badania potwierdzają tezę pracy dotyczącą znacznego zwiększenia własności mechanicznych drutu w wyniku zaproponowanej obróbki cieplno-mechanicznej. Stwierdzono, że czynniki strukturalne wpływające na umocnienie stali pozostają w korelacji z uzyskanymi zmianami własności wytrzymałościowych i plastycznych oraz technologicznych.

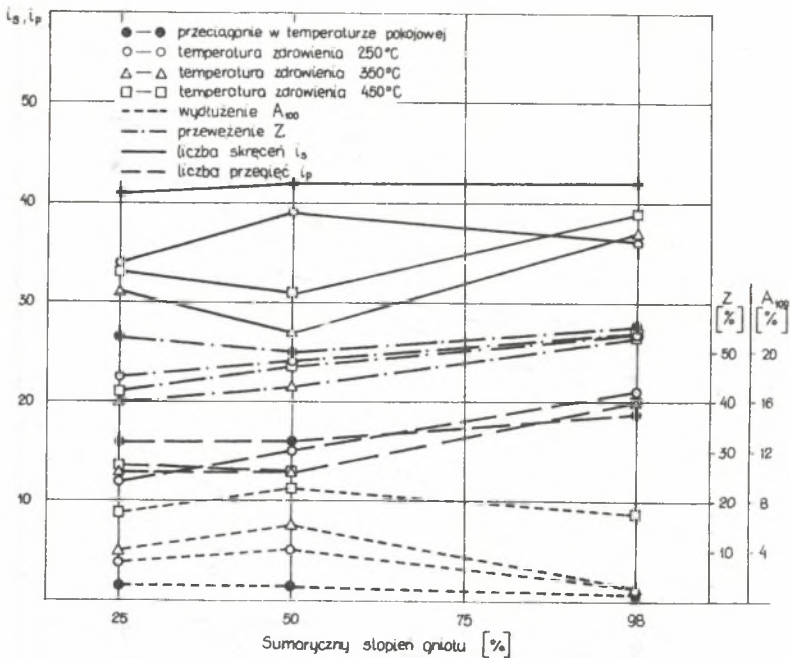
Własności wytrzymałościowe drutu przeciąganego w temperaturze pokojowej rosną ze wzrostem stopnia gniotu od wartości $R_m = 942$ do 1422 MN/m^2 odpowiednio dla gniotów 25 i 98% (rys. 2). Własności plastyczne i technologiczne w badanym zakresie odkształceń zmieniają się nieznacznie (rys.3)

Zastosowanie międzyoperacyjnego wyżarzania (zdrowienia) powoduje wyraźny wzrost własności wytrzymałościowych w porównaniu z własnościami uzyskanymi po odkształceniu plastycznym (rys. 2). Zmiany wartości wydłużenia i liczby przegięć są podobne, natomiast wartości przewężenia i liczby skręceń obniżają się nieznacznie (rys. 3). Maksymalne własności wytrzymałościowe i twardość uzyskano przy temperaturze zdrowienia ok. 350°C .



Rys. 2. Zależność własności wytrzymałościowych i twardości od stopnia gniotu i temperatury zdrowienia drutu ze stali DW45 po odkształceniu plastycznym i zdrowieniu w procesie obróbki cieplno-mechanicznej

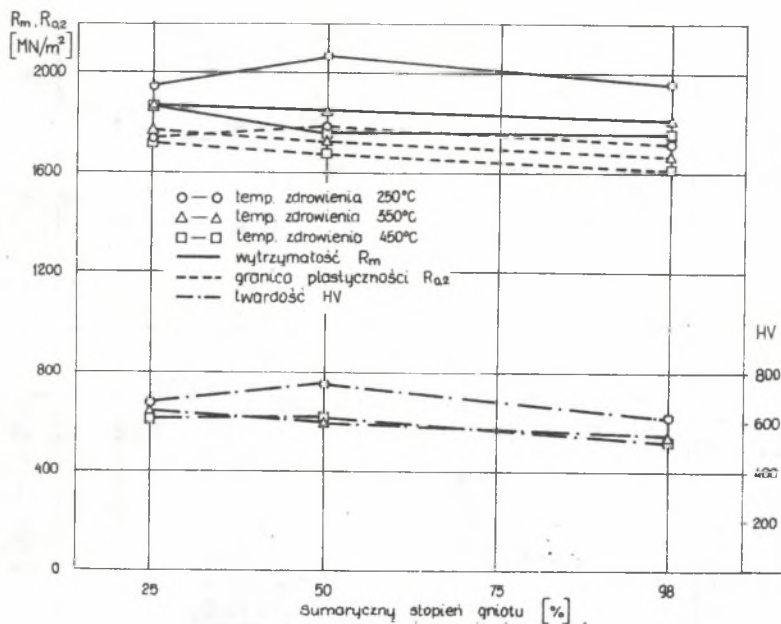
Przebieg zmian własności wytrzymałościowych i technologicznych i uzyskanych po hartowaniu i odpuszczaniu w procesie obróbki cieplno-mechanicznej przedstawiają rys. 4 i 5. Stwierdzono, że własności wytrzymałościowe istotnie zależą od stopnia gniotu i temperatury wyżarzania międzyoperacyjnego. W badanym zakresie odkształceń obserwuje się występowanie wyraźnego maksimum wytrzymałości $R_m = 2078 \text{ MN/m}^2$ dla gniotu 50% i temperatury wyżarzania ok. 250°C . Przy wyższych temperaturach wyżarzania własności te obniżają się nieznacznie ze wzrostem stopnia gniotu i nie zależą istotnie od temperatury wyżarzania (rys. 4). Plastyczność drutu nie ulega natomiast wy-



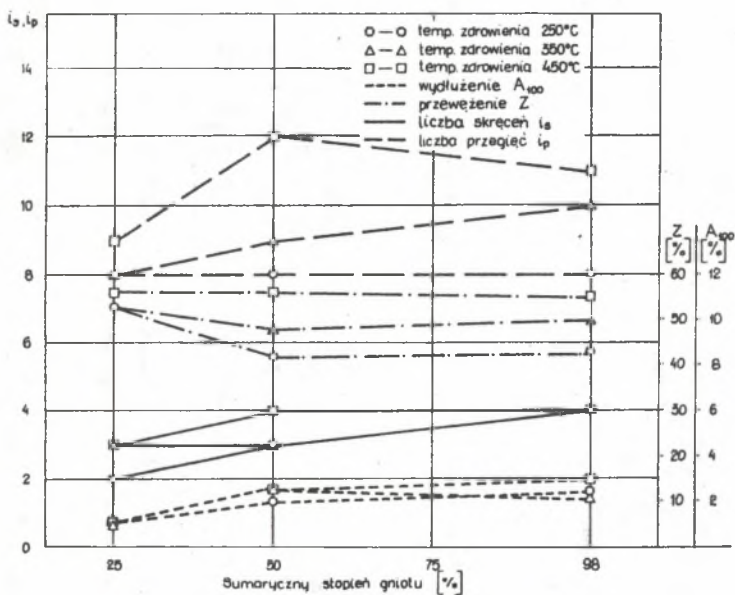
Rys. 3. Zmiany własności plastycznych i technologicznych drutu ze stali DW45 w zależności od stopnia gniotu i temperatury zdrowienia w procesie obróbki cieplno-mechanicznej

rażnym zmianom w stosunku do stanu wyżarzzonego chociaż, wyraźnie maleją własności technologiczne (rys. 5).

Badania struktury stali wykazały, że drut po przeciągnięciu posiada strukturę pasmową, ferrytyczno-perlityczną z ziarnami wydłużonymi w kierunku przeróbki plastycznej (rys. 6). W strukturze stali zgniecionej występuje duża gęstość dyslokacji szczególnie w pobliżu zdeformowanych płytek cementytu (rys. 7). Odległości między płytkami wynoszą ok. $0,1 \pm 0,3 \mu\text{m}$. Niskotemperaturowe wyżarzanie w temperaturze ok. 250°C nie wywołało wyraźnych zmian strukturalnych stali odkształconej plastycznie (rys. 8). Obserwacje mikrostruktury po wyżarzaniu stali w temperaturze 350°C wykazały wyraźną komórkową strukturę dyslokacyjną o małej gęstości dyslokacji wewnątrz komórek i dużej na ich granicach (rys. 9). Stwierdzony rozkład dyslokacji wskazuje na zapoczątkowanie procesu poligonizacji, który zaznacza się wyraźnie po wyżarzaniu stali w temperaturze ok. 450°C (rys. 10 i 11). Stal po hartowaniu metodą indukcyjną posiada strukturę martenzytu płytkowego, częściowo zbliźniaczonego o dużej gęstości dyslokacji z drobnymi wydzieleniami cementytu (rys. 12). Po hartowaniu i odpuszczaniu w struk-



Rys. 4. Zmiany własności wytrzymałościowych i twardości drutu ze stali DW45 obróbnego cieplno-mechanicznie w zależności od stopnia gniotu i temperatury zdrowienia



Rys. 5. Zależność własności plastycznych, technologicznych od stopnia gniotu i temperatury zdrowienia drutu ze stali DW45 obróbnego cieplno-mechanicznie



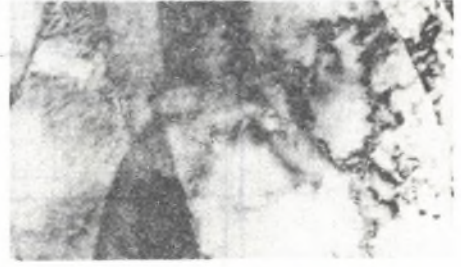
Rys. 6



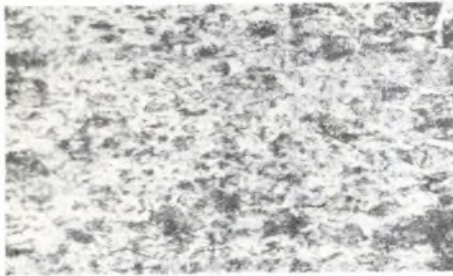
Rys. 7



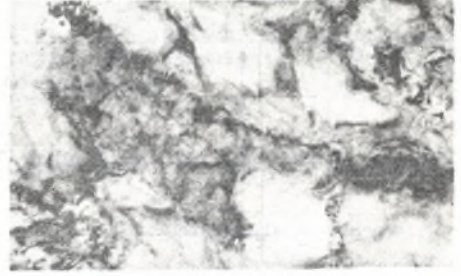
Rys. 8



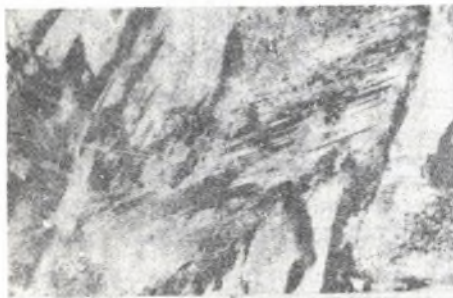
Rys. 9



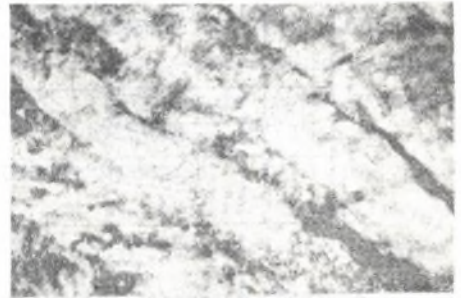
Rys. 10



Rys. 11



Rys. 12



Rys. 13

Nr rys.	Rodzaj i parametry obróbki	Struktura	Powiększenie x
6.	Przeciąganie drutu w temperaturze pokojowej z gniotem 50%	Ziarna ferrytu i perlitu wydłużone w kierunku przeróbki plastycznej	500
7.	Przeciąganie drutu w temperaturze pokojowej z gniotem 50%	Zdeformowane płytki cementytu w osnowie ferrytu o dużej gęstości dyslokacji	76000
8.	Przeciąganie w temperaturze pokojowej; gniot 50%; temperatura zdrowienia 250°C	Płytki cementytu w osnowie ferrytu o dużej gęstości dyslokacji	42000
9.	Przeciąganie w temperaturze pokojowej; gniot 50%; temperatura zdrowienia 350°C	Komórkowa substruktura ziarn ferrytu o zróżnicowanej gęstości dyslokacji	45000
10.	Przeciąganie w temperaturze pokojowej; gniot 50%; temperatura zdrowienia 450°C	Ferryt i perlit o znacznie wydłużonych ziarnach; W osnowie zgniecionego ferrytu zarodki rekryystalizacji	500
11.	Przeciąganie w temperaturze pokojowej; gniot 50%; temperatura zdrowienia 450°C	Substruktura blokowa ferrytu w początkowym stadium poligonizacji	50000
12.	Obróbka cieplno-mechaniczna; z = 50% temp. zdrowienia 350°C; temp. austenit. 850°C	Martensyt zbliźniaczony o dużej gęstości dyslokacji z wydzieleniami cementytu na granicach bliźniaków	50000
13.	Obróbka cieplno-mechaniczna; z = 50% temp. zdrowienia 350°C; temp. aust. 850°C; temp. odp. 300°C	Martensyt odpuszczony o dużej dyslokacji z drobnymi wydzieleniami cementytu	50000

turze stali ujawniono martenzyt odpuszczony o dużej gęstości dyslokacji z drobnymi wydzieleniami cementytu rozłożonymi wewnątrz igieł i na ich granicach (rys. 13).

Zmiany strukturalne zachodzące podczas obróbki cieplno-mechanicznej wskazują, że podwyższenie własności wytrzymałościowych determinowane jest wysoką gęstością dyslokacji, wpływem międzyoperacyjnego zdrowienia, prowadzącego do utworzenia stabilnej substruktury oraz zwiększenia niejednorodności koncentracji węgla w martenzycie i rozdrobnieniem ziarn austenitu przy przemianie $\alpha \rightarrow \delta$. Zwiększenie gęstości dyslokacji po przeciągnięciu drutu tłumaczy proporcjonalny wzrost własności wytrzymałościowych wraz ze wzrostem stopnia gniotu. Hamowanie ruchliwych dyslokacji przez atmosfery Cottrella tworzące się podczas niskotemperaturowego wyżarzania odkształczonej plastycznie stali tłumaczyłoby natomiast podwyższenie własności wytrzymałościowych, uzyskanych po zdrowieniu. Efekt ten zachodzi prawdopodobnie intensywniej przy wyższych stopniach gniotu co wyjaśnia, stwierdzone dla nich większe przyrosty własności wytrzymałościowych.

Stosunkowo wysokie własności wytrzymałościowe, uzyskane po hartowaniu i odpuszczaniu w procesie obróbki cieplno-mechanicznej, związane są ze zmianami struktury podczas zdrowienia, dynamicznego nagrzewania indukcyjnego do temperatury austenizacji oraz w wyniku odpuszczania. Należy przypuszczać, że duża szybkość nagrzewania do hartowania warunkuje drobnoziarnistość austenitu, zachowanie bardziej równomiernego rozkładu dyslokacji na granicach ziarn oraz zmniejszenie lokalnych mikronaprężeń, które następnie ulegają relaksacji w procesie odpuszczania.

Obróbka cieplno-mechaniczna z odkształceniem plastycznym w temperaturze pokojowej, stwarza możliwość polepszenia wytrzymałości stali przy zachowaniu korzystnych własności plastycznych i technologicznych. Wprowadzenie do procesu bezpośredniego nagrzewania indukcyjnego pozwala na znaczne skrócenie czasu operacji technologicznych oraz zmodernizowanie dotychczasowych metod wytwarzania drutu o wysokiej wytrzymałości.

Wnioski

Przeprowadzone badania umożliwiły dokonanie oceny wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na strukturę i własności mechaniczne drutu ze stali DW45, determinując tym samym następujące wnioski:

Własności wytrzymałościowe i technologiczne drutu obrobionego według zastosowanej metody zależą głównie od stopnia gniotu stosowanego podczas przeciągania oraz temperatury wyżarzania międzyoperacyjnego, zapewniającego po hartowaniu i odpuszczaniu indukcyjnym drobnoziarnistą strukturę martenzytu odpuszczonego o wysokich własnościach mechanicznych.

Zespół optymalnych własności mechanicznych: $R_m = 2078 \text{ MN/m}^2$, $R_{0,2} = 1785 \text{ MN/m}^2$, $HV = 750$, $A_{100} = 2\%$, $Z = 39\%$, $i_s = 3$, $i_p = 8$ uzyskanych w wyniku obróbki cieplno-mechanicznej występuje dla gniotu 50% i temperatury zdrowienia ok. 250°C ; warunkuje go drobnoziarnista struktura martenzytu odpuszczonego z dyspersyjnymi wydzieleniami cementytu.

Polepszenie własności wytrzymałościowych drutu tj. wzrost R_m o ok. 10% i $R_{0,2}$ o ok. 50% przy zachowaniu lub nieznacznym obniżeniu własności plastycznych i technologicznych powoduje także niskotemperaturowe zdrowienie stali przeciąganej na zimno.

Wysokie własności wytrzymałościowe i znaczna technologiczność procesu umożliwiają wykorzystanie tej metody w zastosowaniu przemysłowym przy produkcji wysokowytrzymałych drutów stalowych.

LITERATURA

- [1] M.L. Bernsztejn (i in.): Stal, 22, 1962, 346.
- [2] M.L. Bernsztejn (i in.): Fiz. Met. Metałłow., 15, 1, 1963, 82.
- [3] W.M. Kordonskij (i in.): Metałłowod. Term. Obrab. Metałłow., 2, 1964, 2.
- [4] M.L. Bernsztejn: Termomechaniczeskaja obrabotka metałłow i spławow, Metałłurgia, Moskwa, 1968.
- [5] T.J. Koppenaar: Trans. ASM. Quart., 62, 1969, 24.
- [6] T.J. Koppenaar: Metall. Trans., 1, 1970, 3371.
- [7] J.I. Spektor (i in.): Izv. WUZ Czernaja Metałłurgia. 11, 1972, 136.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ СТАЛИ ТИПА DW45 ПОДВЕРГНУТОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Р е з ю м е

Исследовано влияние параметров предварительной термомеханической обработки на структуру и механические свойства стали DW45. После этой обработки получено мелкую структуру отпущенного мартенсита с высокими прочностных и технологических свойствах.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON STEEL WIRE TYPE DW45
AFTER PRELIMINARY THERMOMECHANICAL TREATMENT

S u m m a r y

The effect of the parameters of preliminary thermomechanical treatment on the structure and mechanical properties of carbon steel wire type DW45 have been investigated. After preliminary thermomechanical treatment fine grained structure of steel and good mechanical and technological properties were obtained.