

13. OBRÓBKA CIEPLNA STALI

13.1. Wprowadzenie

Celem obróbki cieplnej jest zmiana własności metali i stopów przez zmianę w stanie stałym budowy strukturalnej. W obróbce cieplnej stopów żelaza zasadniczą rolę odgrywa zjawisko polimorfizmu (alotropii) żelaza, tj. występowania różnych odmian krystalicznych żelaza trwałych w określonych zakresach temperatur i różniących się w sposób istotny szeregiem własności, np. zakresem rozpuszczalności węgla, objętością właściwą, własnościami magnetycznymi itp. W temperaturach przemian alotropowych zmiany własności zachodzą w sposób skokowy, co stwarza możliwość radykalnej przebudowy struktury i tym samym zmianę własności mechanicznych, fizycznych lub chemicznych obrabianych cieplnie elementów.

Podstawowymi czynnikami oddziaływania przy obróbce cieplnej są: temperatura i czas przebiegu procesu. Zabieg obróbki cieplnej można przedstawić za pomocą wykresu w układzie temperatura T – czas τ (rys. 13.1.). Do zasadniczych czynności stosowanych przy różnych zabiegach cieplnych można zaliczyć:

Grzanie – podwyższanie i następne utrzymywanie temperatury przedmiotu,

Nagrzewanie – ciągłe lub stopniowe podwyższanie temperatury,

Podgrzewanie – przez które rozumie się nagrzewanie do temperatury pośredniej,

Dogrzewanie – przez które określa się nagrzewanie do temperatury właściwej dla obróbki cieplnej,

Wyrzewanie – utrzymywanie temperatury na stałym poziomie w czasie potrzebnym do zajęcia zamierzonych procesów,

Chłodzenie – ciągłe lub stopniowe obniżanie temperatury przedmiotu do temperatury określonej warunkami zabiegu, najczęściej temperatury otoczenia,

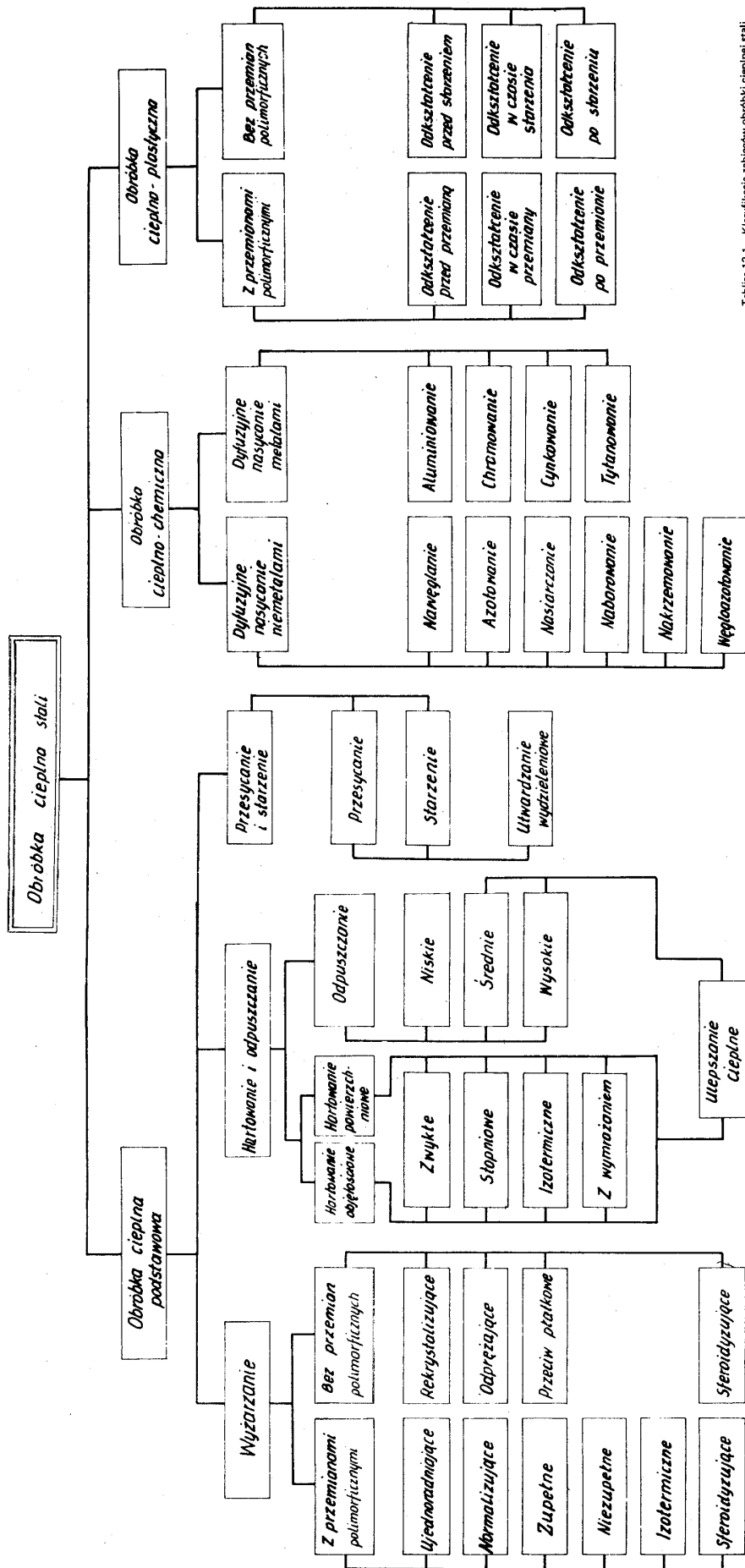
Studzenie, tj. powolne chłodzenie np. w piecu lub spokojnym powietrzu,

Oziębienie, tj. szybkie chłodzenie w wodzie lub oleju,

Wymrażanie, tj. ochłodzenie i wytrzymanie elementu w temperaturze poniżej 0°C .

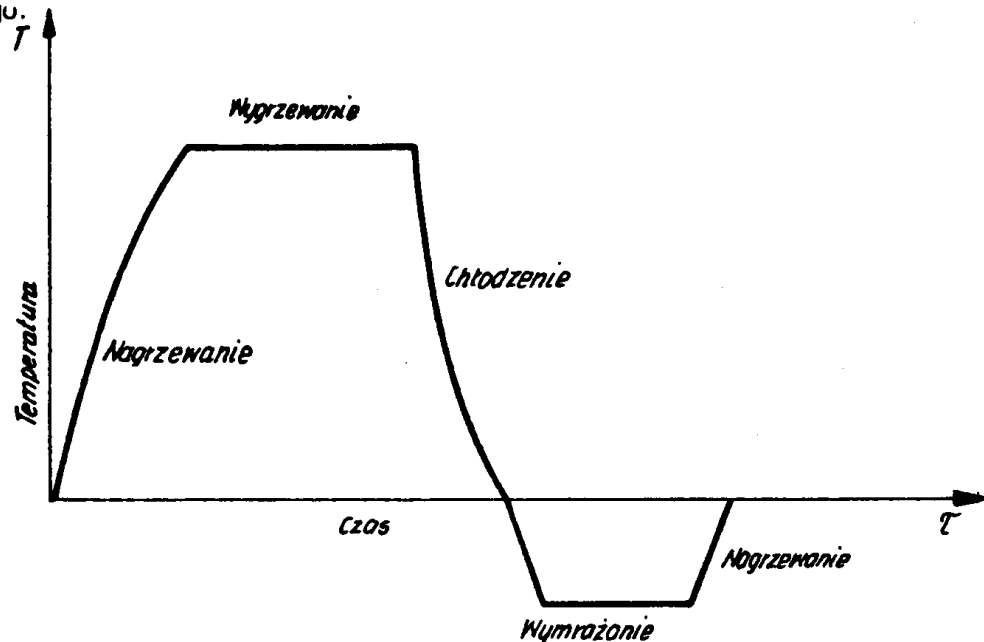
Stosowane są również inne terminy:

- austenityzowanie, tj. wygrzewanie mające na celu uzyskanie struktury austenitycznej,



Tablica 13.1. Klasyfikacja zabiegów obróbki cieplnej stali

- rozpuszczanie, tj. wygrzewanie w temperaturze powyżej linii granicznej rozpuszczalności w celu rozpuszczenia wydzieliń innych faz i uzyskania jednorodnego roztworu stałego.



Rys. 13.1. Przykład złożonego zabiegu obróbki cieplnej

13.2. Klasyfikacja rodzajów obróbki cieplnej

Bardzo często zabiegi cieplne prowadzące do zmian strukturalnych łączy się z innymi procesami np. chemicznym oddziaływaniem ośrodka, odkształceniem plastycznym materiału lub działaniem pola magnetycznego. Dlatego dokładne zdefiniowanie pojęć i określenie z zakresu obróbki cieplnej oraz zestawienie ich w jednolity system ułatwia interpretację i poprawne opracowywanie dokumentacji technologicznej. Przejrzysta klasyfikacja jest przedstawiona w PN–76/H–01200 (tabl. 13.1.).

Zabiegi wyżarzania

Przez wyżarzanie rozumiemy zabiegi, które prowadzą w mniejszym lub większym stopniu do stanu równowagi termodynamicznej w obrabianym materiale. Wyżarzanie obejmuje najczęściej nagrzewanie do wymaganej temperatury, wygrzewanie i studzenie.

Zabiegi hartowania

Hartowaniem przyjęto nazywać zabieg cieplny polegający na austenitowaniu i następnym oziębianiu przedmiotu z szybkością umożliwiającą uzyskanie struktury martenzytycznej lub bainitycznej. W przeciwieństwie do wyżarzania hartowanie zwłaszcza martenzytyczne prowadzi do powstania struktury metastabilnej. Celem hartowania

jest znaczne zwiększenie wytrzymałości i twardości wyrobu.

Zabiegi odpuszczania

Odpuszczanie polega na nagrzewaniu uprzednio zahartowanego przedmiotu do temperatury leżącej poniżej A_1 , co prowadzi do usunięcia naprężeń oraz przemian wywołujących zmniejszenie twardości i wzrost plastyczności stali. Połączenie zabiegu hartowania i wysokiego lub średniego odpuszczania nazywamy ulepszeniem cieplnym.

Zabiegi przesycań i starzenia

Mogą być stosowane w stopach, w których obserwujemy zmniejszanie rozpuszczalności jednego ze składników w stanie stałym z obniżaniem temperatury. Przesycań ma na celu uzyskanie przesyconego roztworu stałego. Starzenie prowadzi do wydzielenia dyspersyjnych cząstek. Efektem jest wzrost twardości i wytrzymałości stopu oraz obniżenie plastyczności. Połączenie obu zabiegów nazywamy utwardzaniem wydzieleniowym.

13.3. Podstawowe przemiany zachodzące w stalach

Podstawą obróbki cieplnej stopów są przemiany fazowe. Można je podzielić na dwie podstawowe grupy: dyfuzyjne i bezdyfuzyjne. W przemianach dyfuzyjnych konieczna jest dyfuzja, a więc istotną rolę odgrywa w nich oprócz temperatury, czas. Zachodzą one przez zarodkowanie i wzrost zarodków. W przemianach bezdyfuzyjnych dyfuzja nie odgrywa żadnej roli i dlatego mogą one zachodzić z bardzo dużymi prędkościami. Przemiany bezdyfuzyjne są nazywane również martenzytycznymi. W stalach można wywołać przemianę martenzytyczną przez chłodzenie austenitu z odpowiednią prędkością.

W przemianach fazowych zachodzących w stalach biorą udział następujące podstawowe składniki strukturalne: austenit – γ , ferryt – α , cementyt – Fe_3C , perlit – ($\alpha + Fe_3C$) i martenzyt – M. W rzeczywistości zachodzą następujące cztery przemiany:

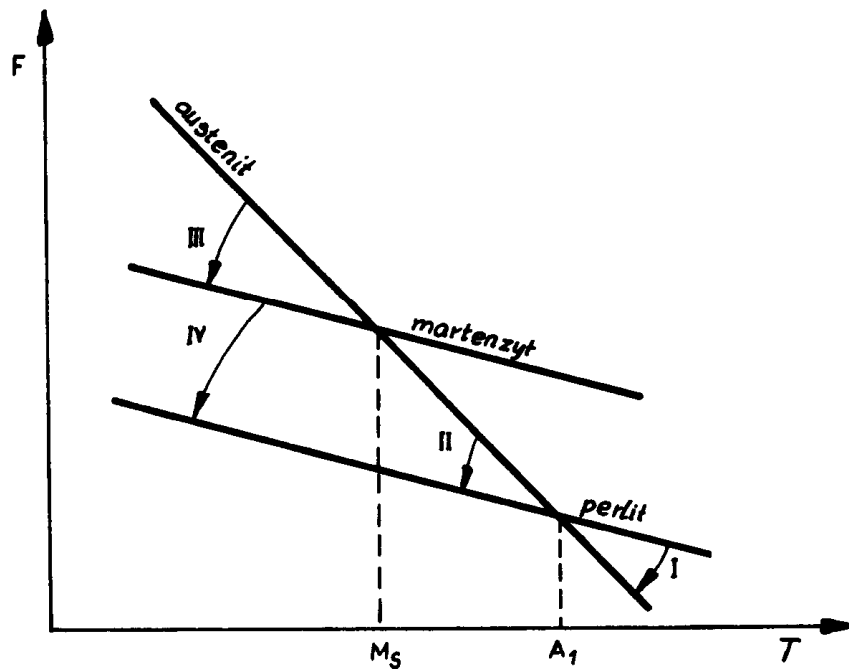
I; II $\alpha + Fe_3C \rightleftharpoons \gamma$ – przemiana perlitu w austenit i odwrotna,

III $\gamma \rightarrow M$ – przemiana austenitu w martenzyt (nieodwracalna),

IV $M \rightarrow \alpha + Fe_3C$ – przemiana martenzytu w ferryt i cementyt (nieodwracalna).

Wszystkie te przemiany zachodzą dzięki dążeniu układu do obniżenia energii swobodnej (rys. 13.2.). Bezpośrednia przemiana martenzytu w austenit nie zachodzi, gdyż martenzyt już w temperaturach poniżej A_1 ulega rozkładowi na ferryt i cementyt a przemiana perlitu w martenzyt jest niemożliwa, gdyż jak wynika z rys. 13.2., martenzyt ma większą energię swobodną od perlitu w całym zakresie temperatur. Przemiana bainityczna nie została zaliczona do przemian głównych, gdyż można ją traktować jako pośrednią (perlityczno-martenzytyczną).

Istotnych informacji o kinetyce przemian fazowych przechłodzonego austenitu w warunkach izotermicznych dostarczają wykresy CTPi (czas – temperatura – przemiana



Rys. 13.2. Zmiana energii swobodnej austenitu, martenzytu i perlitu w funkcji temperatury (schemat)

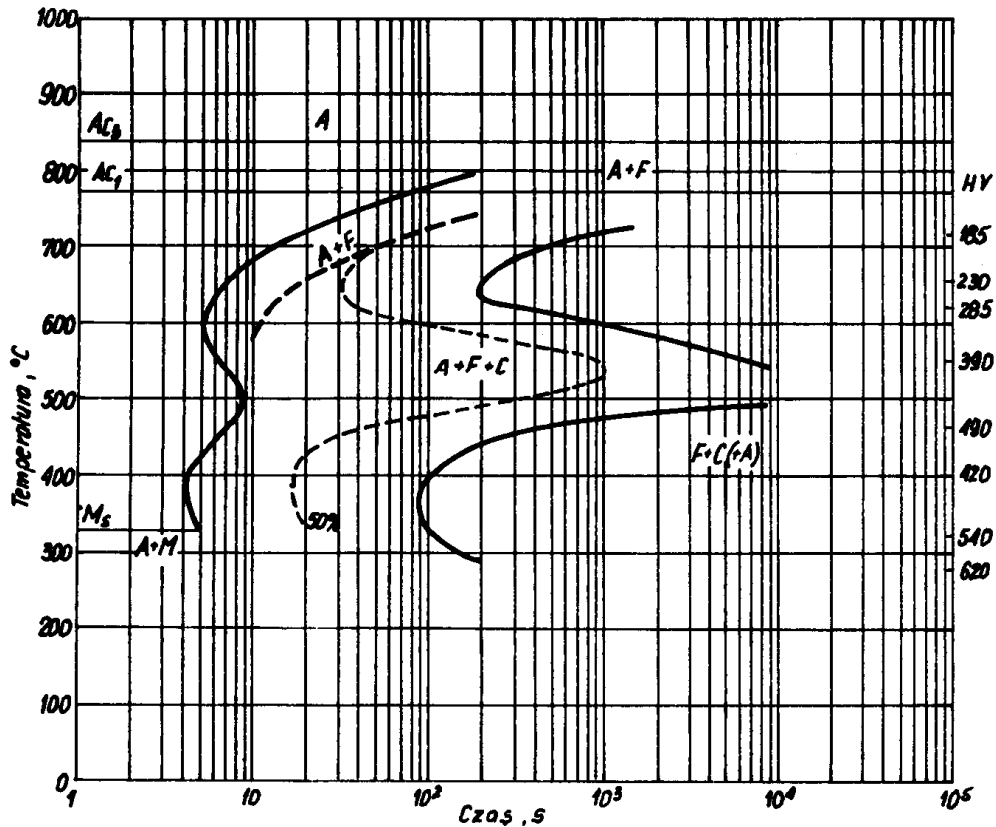
izotermiczna); natomiast w warunkach chłodzenia ciągłego przy różnych szybkościach – wykresy CTPc. Na wykresach izotermicznych CTPi (rys. 13.3.) podawane są linie początku i końca przemiany austenitu w poszczególne rodzaje struktur w zależności od stałej temperatury przemiany. Czas rozpoczęcia i zakończenia przemiany odczytuje się przez rzutowanie na logarytmiczną skalę czasu punktów przecięcia odpowiedniej prostej poziomej z krzywymi początku i końca przemiany. Często podawane są również twardości struktur odpowiadających danej temperaturze przemiany. Wykresy CTPc (rys. 13.4.) różnią się od izotermicznych zmienionym kształtem i położeniem obszarów współistnienia austenitu z poszczególnymi rodzajami struktur oraz naniesieniem krzywych przedstawiających różne szybkości chłodzenia ciągłego. Temperatury początku i końca przemiany i odpowiadające im czasy odczytuje się przez rzutowanie punktów przecięcia krzywych szybkości chłodzenia z granicami obszarów przemian. Jeżeli krzywa szybkości chłodzenia przecina obszary różnych struktur, oznacza to, że w wyniku przemiany powstaje kilka struktur, których udział procentowy może być również podany na wykresie.

Wykresy CTPi stanowią podstawę do ustalania:

- temperatury i czasu wyżarzania izotermicznego,
- temperatury kąpeli chłodzącej i czasu chłodzenia przy hartowaniu z przemianą izotermiczną,
- temperatury i czasu chłodzenia w kąpeli gorącej przy hartowaniu stopniowym.

Z wykresów CTPc korzysta się przy ustalaniu:

Zawartość składników, %							Warunki austenitowania		Wielkość ziarna nr
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	temperatura °C	czas min	
0,32	0,98	1,30	0,034	0,005	1,20	0,18	900	15	8



Rys. 13.3. Wykres CTPi dla stali 35HGS

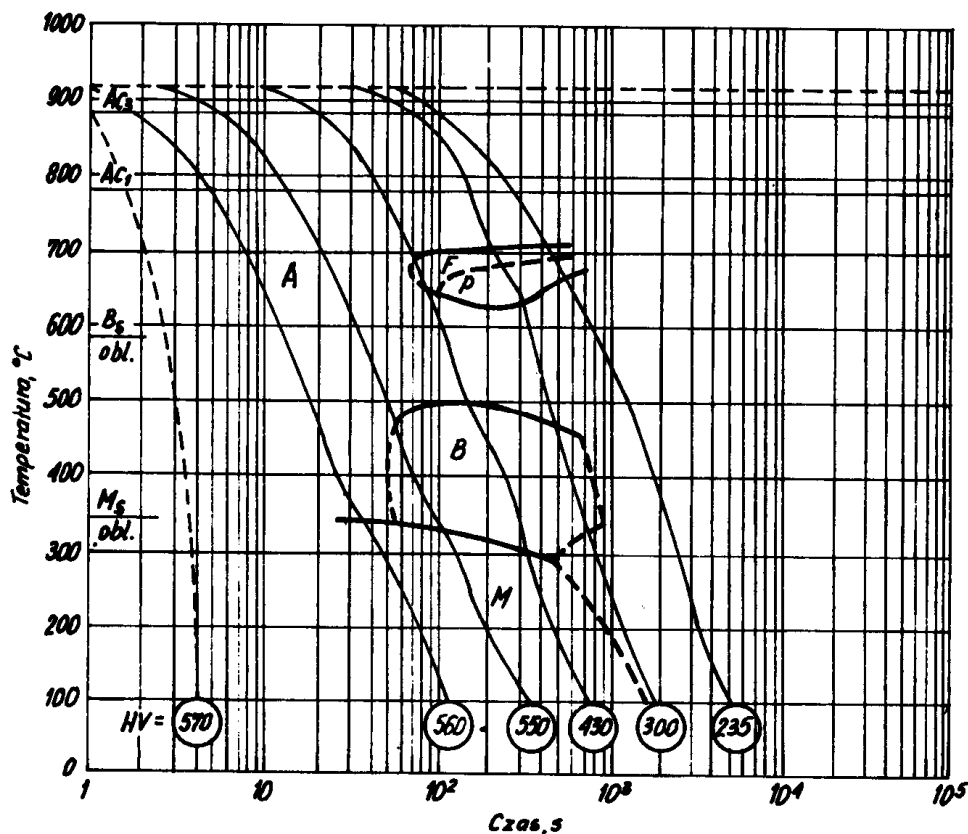
- szybkości chłodzenia i końcowej temperatury regulowanego chłodzenia przy wyżarzaniu zupełnym na założoną twardość,
- struktury i twardości po normalizowaniu w funkcji wielkości przekroju (szybkości chłodzenia),
- zależności struktury i twardości od szybkości chłodzenia podczas hartowania zwykłego.

13.4. Hartowanie stali

13.4.1. Dobór temperatury i czasu grzania

Temperatura, do której nagrzewamy stal przed hartowaniem, czyli tzw. temperatura

Zawartość składników, %						Warunki austenitizowania	
C	Mn	Si	P	S	Cr	temperatura °C	czas min
0,34	0,94	1,21	0,022	0,014	1,14	920	20



Rys. 13.4. Wykres CTPc dla stali 35HGS

austenitizowania powinna zapewnić przejście struktur wyjściowych w austenit, nie może jednak być zbyt wysoka aby nie nastąpił rozrost ziarna austenitu. Optymalna temperatura hartowania stali podutektoidalnych jest zwykle wyższa o 30–50^o C od temperatury Ac₃, a stali eutektoidalnych i nadeutektoidalnych – wyższa o 30–50^o C od Ac₁. W zależności od rodzaju i zawartości pierwiastków stopowych, wymiarów i kształtów części, rodzaju ośrodka chłodzącego a także od wymaganych własności po hartowaniu – prawidłowa temperatura austenitizowania może znacznie odbiegać od wyżej podanych zaleceń. W praktyce posługujemy się normami lub kartami materiałowymi, w których zwykle są podane zalecane temperatury obróbki cieplnej dla poszczególnych gatunków stali.

Dla stali węglowych i niskostopowych temperaturę hartowania możemy określić bezpośrednio z wykresu Fe-Fe₃C. Pewna trudność polega na tym, że na ogół rzadko spotyka się wykresy Fe-Fe₃C z dokładnie wyznaczonym przebiegiem temperatury Ac₃ (linia GOS). Znając trzy punkty linii GOS, łączy się je odcinkami prostymi, wykreślając jej przybliżony przebieg. Na rysunku 13.5. przedstawiono przybliżony przebieg linii GOS i porównano ją z wyznaczonymi eksperymentalnie punktami początku wydzielania się ferrytu.

Drugi parametr, jakim jest czas grzania (tj. czas nagrzewania i wygrzewania), jest również bardzo istotny, gdyż procesy zachodzące w czasie grzania mają charakter dyfuzyjny, a efekt dyfuzji jest proporcjonalny do $\sqrt{D\tau}$, gdzie D – współczynnik dyfuzji (zależy wykładniczo od temperatury), τ – czas. Zbyt krótki okres grzania może być niewystarczający do zajścia przemiany, zbyt długi może doprowadzić do rozrostu ziarna lub nadmiernej koagulacji faz.

Przy wyznaczaniu czasu nagrzewania τ_n i wygrzewania τ_w można posłużyć się równaniami na szybkość rozchodzenia się ciepła, które jednak nie uwzględniają wielu czynników dodatkowych i uzyskane wyniki są mało dokładne. W warunkach przemysłowych stosowane są różnego rodzaju wzory doświadczalne. Według Gulajewa czas nagrzewania stali węglowych w przedziale temperatur hartowania 800–900° C można obliczyć następująco:

$$\tau_n = 0,1 \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad [\text{min}] \quad (13.1.)$$

gdzie:

- D₁ – wymiar charakterystyczny (w mm), będący najmniejszym wymiarem największego przekroju,
- K₁ – współczynnik środowiska nagrzewającego (dla gazu 2, dla stopionej soli 1, dla stopionego metalu 0,5),
- K₂ – współczynnik kształtu przedmiotu (kula –1, walec –2, prostopadłościan – 2,5, płyta – 4),
- K₃ – współczynnik równomierności nagrzewania (przy nagrzewaniu ze wszystkich stron – 1, z trzech stron – 1,5, z jednej strony – 4).

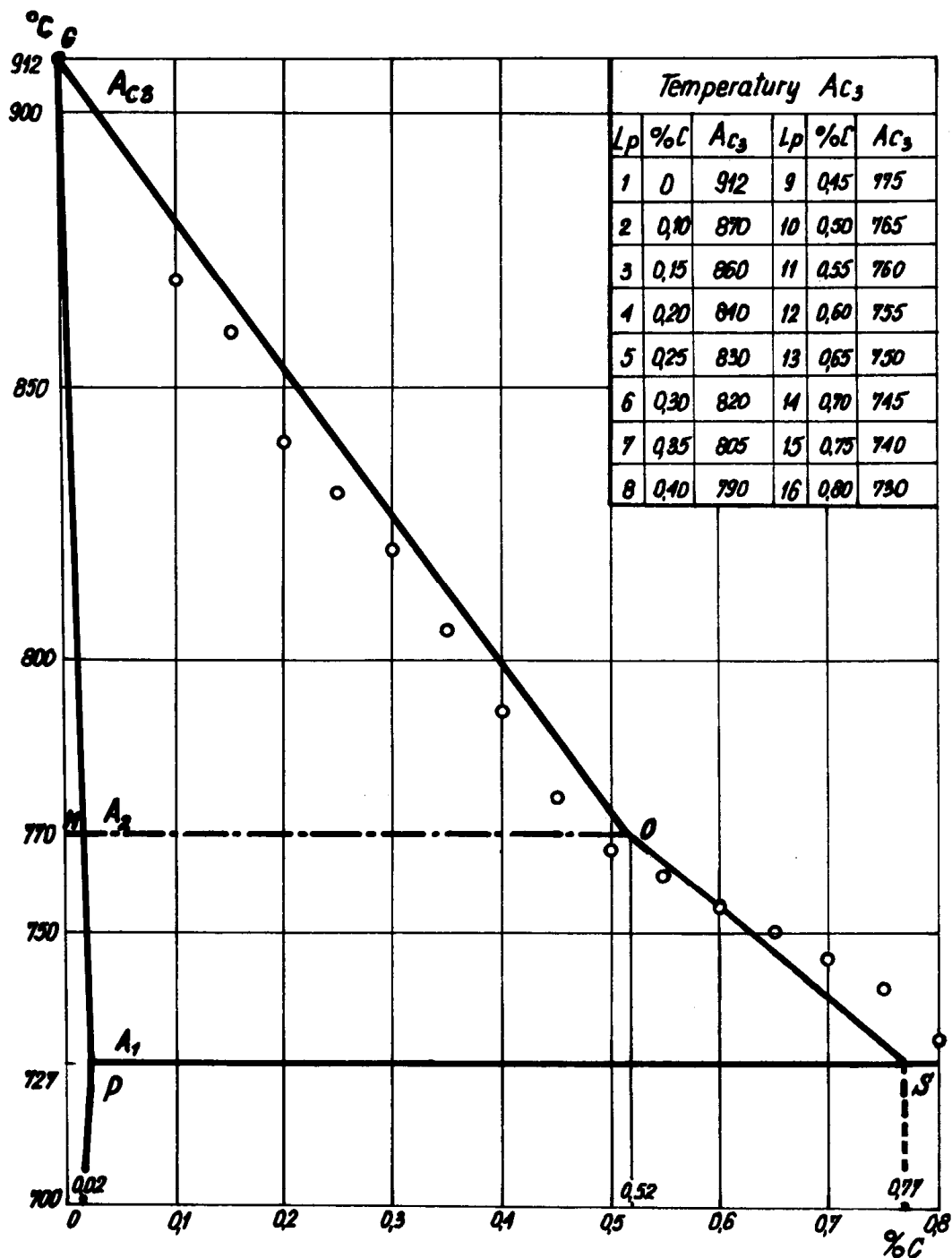
Podany sposób obliczania jest przybliżony, gdyż w rzeczywistości na szybkość nagrzewania wpływa także temperatura pieca, wielkość ładunku, charakterystyka cieplna pieca, sposób ułożenia, stan powierzchni itp.

Czas wygrzewania τ_w przyjmuje się jako 20 do 30% czasu nagrzewania, przy czym dla przedmiotów o małych wymiarach należy przyjmować współczynniki większe.

Całkowity czas wytrzymania elementów w piecu do hartowania wynosi:

$$\tau_g = \tau_n + \tau_w = (1,2 - 1,3) \tau_n \quad [\text{min}] \quad (13.2.)$$

W warunkach laboratoryjnych wystarczy przyjąć 1,5 do 2 minut czasu grzania na 1 mm średnicy lub grubości przekroju.



Rys. 13.5. Porównanie rzeczywistych temperatur A_{c3} dla różnych zawartości węgla z przebiegiem krzywej GOS wyznaczonej metodą uproszczoną. Współrzędne punktów G, O, S wg najnowszej wersji układu żelazo-cementyt (J. Chipman – 1972 r.)

13.4.2. Ośrodki chłodzące

Ponieważ struktura stali zależy od zastosowanej szybkości chłodzenia (rys. 13.4.), dobór odpowiedniego ośrodka chłodzącego ma decydujący wpływ na wynik hartowania. Jest to istotne tym bardziej, że krytyczne prędkości chłodzenia różnych stali zmieniają się w szerokich granicach w zależności od ich składu chemicznego, wielkości ziarna i jednorodności austenitu. Jeżeli dysponuje się wykresem CTPc dla określonego gatunku stali, można obliczyć krytyczną prędkość chłodzenia V_k w zakresie od temperatury A_{r1} do temperatury T_m , tj. najmniejszej trwałości austenitu. Przy jej obliczaniu posługujemy się zależnością:

$$V_k = \frac{A_{r1} - T_m}{\tau_m} \quad (13.3.)$$

gdzie: τ_m – czas trwałości przechłodzonego austenitu.

Przy korzystaniu z wykresu CTPi wyznaczona wartość V_k jest około 1,5 razy mniejsza.

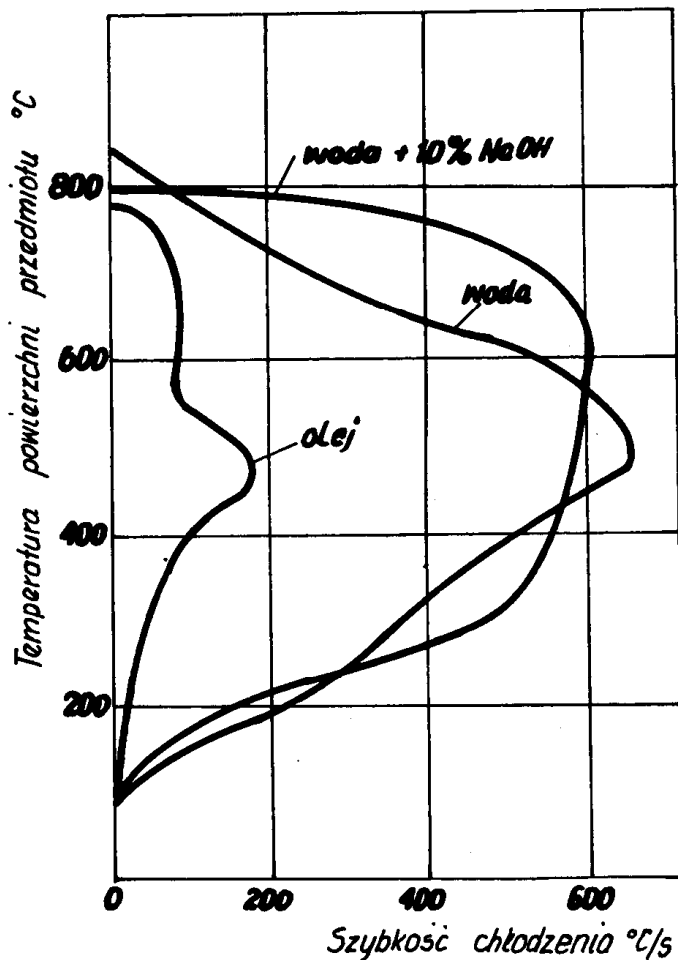
Racjonalne hartowanie polega więc na doborze dla określonego gatunku stali takiej prędkości chłodzenia, aby uniknąć dyfuzyjnej przemiany austenitu, ale jednocześnie nie wywołać dużych naprężeń spowodowanych zbyt szybkim odprowadzeniem ciepła. Dla większości stali konstrukcyjnych najbardziej istotna jest szybkość chłodzenia w zakresie temperatur 700–450^o C, gdyż ona decyduje przede wszystkim o uniknięciu przemian dyfuzyjnych. Z kolei w zakresie przemiany martenzytycznej szybkość chłodzenia powinna być mała, aby uniknąć nakładania się naprężeń strukturalnych i cieplnych. Każdy ośrodek chłodzący wykazuje zmianę intensywności chłodzenia z temperaturą. Jak wynika z rysunku 13.6., najenergiczniejszym ośrodkiem chłodzącym jest woda, którą stosuje się przy hartowaniu stali węglowych. Szybkość chłodzenia można jeszcze regulować temperaturą ośrodka. Ze wzrostem temperatury intensywność chłodzenia maleje, natomiast wprowadzenie NaCl lub NaOH do wody zwiększa intensywność chłodzenia.

Olej cechuje znacznie mniejsza intensywność chłodzenia (rys. 13.6.) i dlatego stosowany jest do hartowania stali konstrukcyjnych stopowych oraz stopowych-narzędziowych. Szybkość chłodzenia w oleju zależy również od jego temperatury i gęstości.

Najniższą intensywność chłodzenia ma spokojne powietrze (kilka ^o C/s), można ją jednak zwiększyć do około 35^o C/s, stosując nadmuch sprężonym powietrzem. Względny ruch cieczy również przyspiesza odprowadzanie ciepła, gdyż powoduje rozerwanie powłoki parowej. Jako ośrodki chłodzące są stosowane również stopione sole (przy hartowaniu izotermicznym) i kąpielenie metalowe (przy patentowaniu drutu).

13.4.3. Sposoby hartowania

Hartowanie zwykłe – przeprowadza się przez ciągłe oziębianie austenitizowanej stali w ośrodku o temperaturze niższej od M_s , aż do wyrównania temperatur przedmiotu



Rys. 13.6. Zależność szybkości chłodzenia różnych ośrodków od temperatury przedmiotu

zazwyczaj na powietrzu, dzięki czemu zanikają naprężenia cieplne.

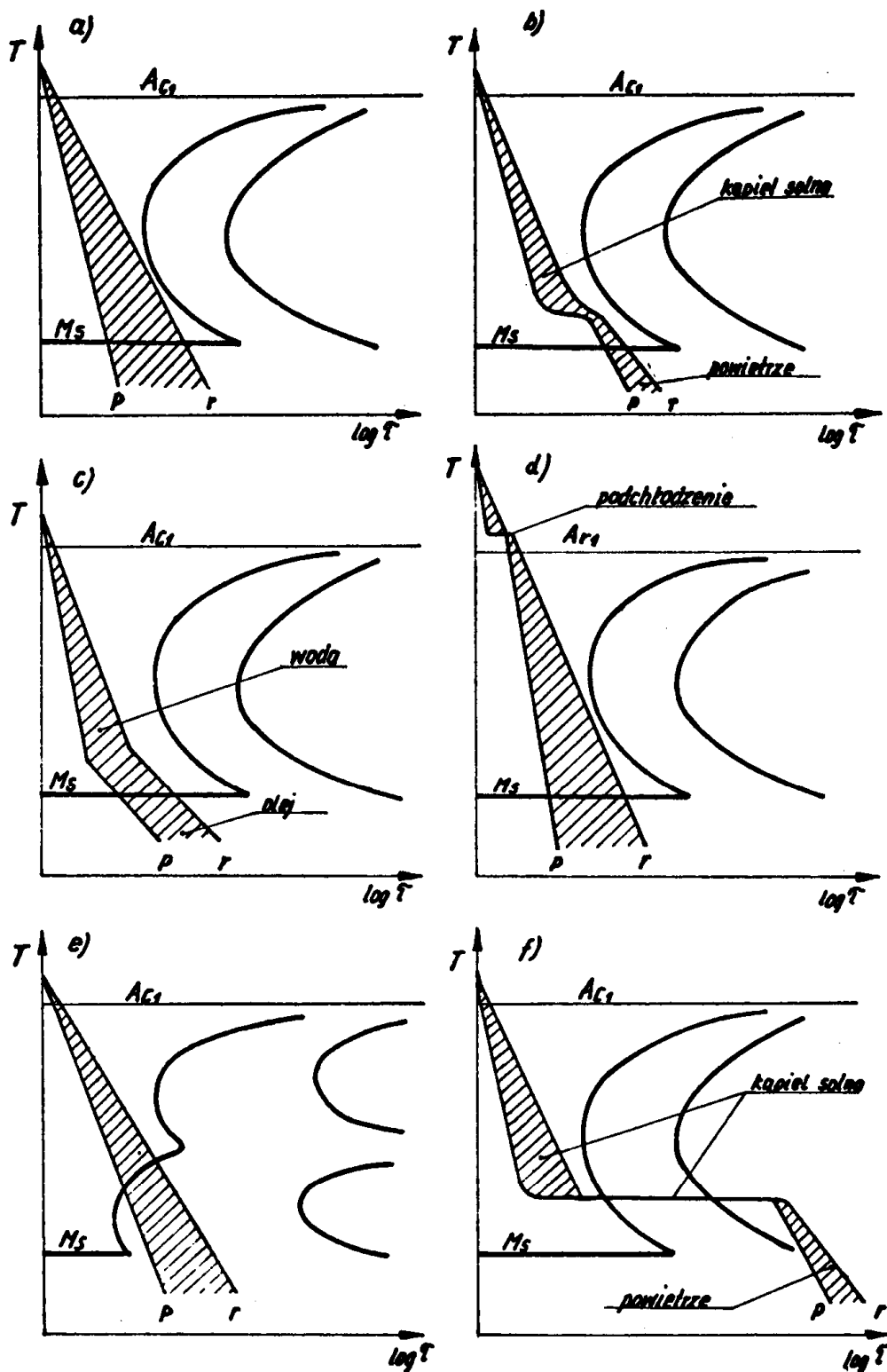
Hartowanie przerywane – stosuje się dwa ośrodki chłodzące (rys. 13.7.c.): najpierw wodę, która daje dużą szybkość chłodzenia do temperatur około 450°C i pozwala na uniknięcie przemian perlitycznych, a następnie olej, który znacznie zmniejsza intensywność odprowadzania ciepła w zakresie temperatury M_s i tym samym redukuje naprężenia, obniżając skłonność do pęknięcia i krzywienia się elementów.

Hartowanie z podchłodzeniem – przed właściwym hartowaniem stosuje się podchłodzenie do temperatury nieco wyższej od A_{r1} , co powoduje obniżenie naprężeń cieplnych (rys. 13.7.d.). Zwykle martenzyt będzie gruboiglasty ale bez pęknięć.

Hartowanie bainityczne zwykłe – stosujemy oziębianie ciągłe w ośrodku o właściwościach chłodzących zapewniających uzyskanie struktury składającej się głównie z bainitu (rys. 13.7.e.).

hartowanego i kąpieli (rys. 13.7a.). Przy odpowiednio dobranym ośrodku chłodzącym uzyskuje się wtedy strukturę martenzytyczną. W materiale występują jednak naprężenia wewnętrzne, spowodowane przemianą austenitu w martenzyt, niejednoczesną na powierzchni i w rdzeniu przedmiotu.

Hartowanie stopniowe – przedmiot po austenitowaniu chłodzi się w kąpiel, której temperatura jest nieco wyższa od M_s i wytrzymuje przez okres czasu konieczny do wyrównania temperatur na całym przekroju (rys. 13.7b.). Czas ten powinien być jednak niezbyt długi, aby nie zapoczątkować przemiany bainitycznej. Chłodzenie po wytrzymaniu izotermicznym może być bardzo wolne,



Rys. 13.7. Sposoby hartowania stali: a/ hartowanie zwykłe martenzytyczne, b/ hartowanie stopniowe martenzytyczne, c/ hartowania martenzytyczne przerywane, d/ hartowanie martenzytyczne z podchłodzeniem, e/ hartowanie bainityczne zwykłe, f/ hartowanie bainityczne izotermiczne

Stosuje się przede wszystkim do niektórych stali stopowych, w których przemiana bainityczna zachodzi łatwiej niż perlityczna.

Hartowanie bainityczne izotermiczne – przeprowadza się podobnie jak hartowanie stopniowe, to znaczy po austenitzowaniu ochładza się w kąpeli o temperaturze wyższej od M_s , ale wytrzymuje się przez okres czasu konieczny do zajścia przemiany bainitycznej (rys. 13.7.f.).

Oprócz omówionych sposobów hartowania, różniących się głównie sposobem oziębiania, rozróżnia się hartowanie objętościowe, w którym austenitzowanie obejmuje całą objętość przedmiotu oraz hartowanie powierzchniowe z szybkim nagrzewaniem tylko wierzchniej warstwy materiału.

13.5. Odpuszczanie stali

Odpuszczanie polega na nagrzewaniu uprzednio zahartowanej stali do temperatur poniżej A_1 i wytrzymaniu przy określonej temperaturze przez czas konieczny do zajścia przemiany. Najistotniejszą przemianą zachodzącą w zahartowanej stali jest rozkład martenzytu w mieszaninę faz złożoną z ferrytu i węglików. Mieszanina taka ma niższą energię swobodną (patrz rys. 13.2.) niż martenzyt, co jest siłą napędową przemiany. Podczas nagrzewania zahartowanej stali obserwuje się również inne procesy, które mają istotny wpływ na własności stali, jak: rozkład austenitu szczątkowego, przemianę węgla ϵ w cementyt i koagulację cementytu. Intensywność tych procesów zależy od temperatury i w mniejszym stopniu od czasu odpuszczania.

Wykorzystując fakt, że martenzyt jest strukturą metastabilną, można w dość szerokich granicach zmieniać własności zahartowanej stali. W praktyce przemysłowej rozróżnia się trzy rodzaje odpuszczania (PN-76/H-01200):

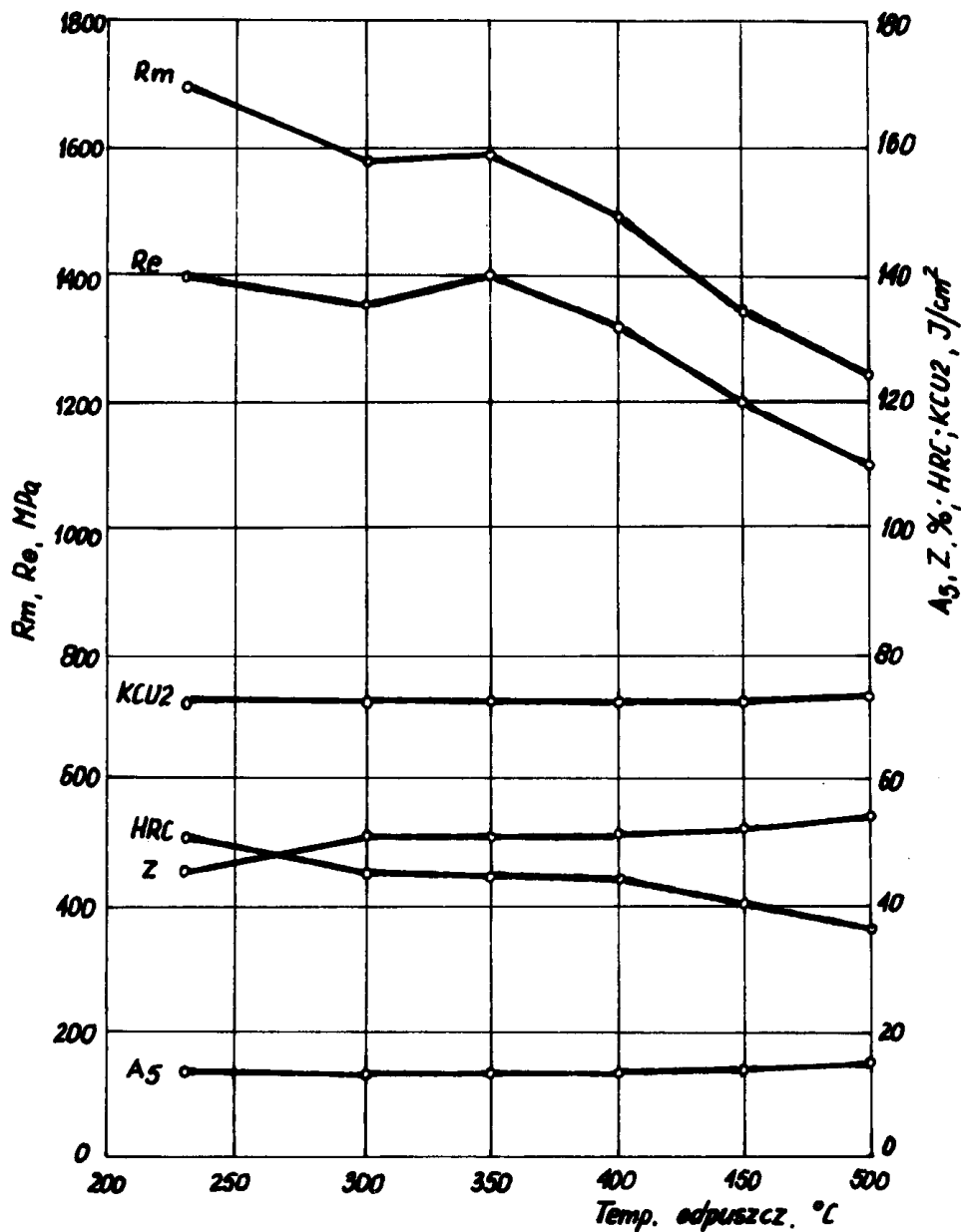
- niskie 150 – 250^o C,
- średnie 250 – 500^o C,
- wysokie 500 – A_1 .

Jako czas odpuszczania przyjmuje się najczęściej 1–2 h, gdyż taki okres czasu powoduje dostateczną stabilizację własności obrabianej stali.

Odpuszczaniu niskiemu poddaje się głównie narzędzia, które powinna cechować wysoka twardość i odporność na ścieranie. Takie odpuszczanie nie obniża twardości ale odpręża materiał i zmniejsza jego skłonność do pękania.

Odpuszczanie średnie jest stosowane w celu nadania obrabianym elementom wysokiej granicy sprężystości przy równoczesnym polepszeniu ich własności plastycznych. Takie własności powinny posiadać sprężyny i resory. Po średnim odpuszczaniu otrzymuje się strukturę odpuszczonego martenzytu o twardości około 450 HB.

Po odpuszczaniu wysokim własności wytrzymałościowe takie jak: R_m , R_e , HB wyraźnie maleją, a plastyczne A_5 i Z wzrastają (rys. 13.8.). Wiąże się to z istotnymi zmia-



Rys. 13.8. Wpływ temperatury odpuszczania na własności mechaniczne stali 35HGS

nami jakie zachodzą w mikrostrukturze stali. W tym zakresie temperatur powstaje bowiem sorbit, który jest mieszaniną złożoną z ferrytu i bardzo drobnych kulistych wydzieliń cementytu. Ze wzrostem temperatury lub czasu następuje koagulacja cementytu. Wysokie odpuszczanie jest zalecane dla elementów maszyn wykonanych ze stali konstrukcyjnych, węglowych i stopowych, gdyż po takiej obróbce uzyskuje się optymalną kombinację własności wytrzymałościowych i plastycznych, to jest stosunkowo dużą udurowność i wydłużenie przy maksymalnym stosunku Re/Rm .

Widoczny wpływ na strukturę i własności stali wywiera również czas odpuszczania. Równoważność temperatury i czasu uwzględnia tak zwany parametr Hollomona i Jaffego:

$$M = T (C + \log \tau) \quad (13.4.)$$

gdzie:

- T – temperatura odpuszczania w K
- C – stała (dla stali o zawartości 0,15–0,45% C wynosi 19,5)
- τ – czas odpuszczania w godzinach.

Twardość stali po odpuszczaniu jest identyczna jeśli temperatura i czas zmieniają się w taki sposób aby $M = \text{const}$. Ze wzoru (13.4.) wynika, że temperatura odgrywa znacznie większą rolę niż czas, który występuje w logarytmie (np. 100-krotne zwiększenie czasu odpuszczania odgrywa taką samą rolę jak wzrost temperatury o 10% w K).

Przy ustalaniu temperatury odpuszczania należy pamiętać o zjawisku kruchości odpuszczania, które objawia się spadkiem udarności w stopniu zależnym od gatunku stali, jej czystości oraz temperatury i czasu odpuszczania. Rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje kruchości:

- kruchość I rodzaju (nieodwracalną) powstającą po odpuszczaniu w zakresie 250–400° C,
- kruchość II rodzaju (odwracalną) powstającą po odpuszczaniu w zakresie 500–650° C.

Kruchość odpuszczania pierwszego rodzaju występuje prawie we wszystkich gatunkach stali węglowych i stopowych, z wyjątkiem stali z podwyższoną zawartością krzemu. Objawia się ona zmniejszeniem udarności stali odpuszczanych w zakresie temperatur około 300° C niezależnie od szybkości ich chłodzenia. Ponieważ nie można jej usunąć przez ponowne odpuszczanie, określa się ją jako nieodwracalną. Zjawisko to wiąże się z przemianą austenitu szczątkowego lub nierównomiernym odpuszczaniem martenzytu, który najszybciej rozkłada się na granicach ziarn byłego austenitu.

Na drugi rodzaj kruchości odpuszczania wrażliwe są tylko niektóre gatunki stali konstrukcyjnych stopowych, a w szczególności stale Cr, Mn, Cr-Mn, Cr-Ni i Cr-V. Zjawisko to występuje po odpuszczaniu stali powyżej 500° C i powolnym chłodzeniu lub długotrwałym wytrzymaniu w krytycznym zakresie temperatur. Kruchości odpuszczania drugiego rodzaju można zapobiec przez szybkie ochłodzenie stali po odpuszczaniu (w oleju) lub przez stosowanie stali z dodatkiem około 0,3% Mo. Uważa się, że przyczyną kruchości tego rodzaju jest segregacja fosforu do granic ziarn, które zostają zubożone w pierwiastki stopowe (Mn, Cr) wskutek utworzenia się węglików podczas odpuszczania. Skupienie fosforu na granicach ziarn wywołuje kruchość stali.

13.6. Obróbka podzerowa

Obróbka podzerowa, zwana również wymrażaniem, ma na celu spowodowanie ma-

ksymalnego rozkładu austenitu pozostałego po hartowaniu. Osiąga się to w wyniku schładzania stali poniżej temperatury M_f , która dla stali o zawartości około 0,7% C znajduje się w pobliżu 0°C . Zmniejszenie ilości nie przemienionego austenitu w zahartowanej stali prowadzi z jednej strony do zwiększenia twardości, a z drugiej do stabilizacji wymiarów, co ma duże znaczenie zwłaszcza przy narzędziach pomiarowych. Do wymrażania stosuje się zwykle stały CO_2 , który daje temperaturę minus 80°C . Zabieg wymrażania należy przeprowadzać bezpośrednio po zahartowaniu (rys. 13.1.), gdyż dłuższe przetrzymywanie przy temperaturze pokojowej powoduje stabilizację austenitu.

13.7. Przebieg ćwiczenia

13.7.1. Hartowanie zwykłe, stopniowe i izotermiczne stali

A. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z istotą przemian strukturalnych zachodzących podczas różnych rodzajów hartowania stali oraz przyswojenie zasad racjonalnego doboru ośrodków chłodzących.

B. Materiały i urządzenia do badań

Przedmiotem badań są próbki stalowe o wymiarach $\phi 30 \times 8$ mm wykonane ze stali w gat. 30G2, 20H2M, 30HM, 40H, 40HM, 45H, 45G2, 40HNM, 37HGNM lub inne według wskazań prowadzącego. Każda próbka winna posiadać otwór $\phi 2-3$ mm umożliwiający zamocowanie. Próbki do badań w ilości 3 szt. wręcza prowadzący ćwiczenia. W przypadku stwierdzenia na powierzchni próbek śladów korozji lub zanieczyszczeń należy je usunąć przy użyciu papieru ściernego.

Do wykonania ćwiczenia niezbędne są następujące urządzenia i materiały pomocnicze:

- piec elektryczny tyglowy lub muflowy do austenitowania próbek,
- piec elektryczny tyglowy z kąpielą saletrzaną (50% azotanu sodu + 50% azotanu potasu),
- twardościomierz Brinella i Rockwella,
- wanna z wodą, wentylator,
- okulary ochronne, rękawice azbestowe,
- elektrograf, papiery ściernie, drut do mocowania próbek,
- karty materiałowe lub normy, odbitki wykresów CTPi dla badanych gatunków stali:

Uwaga: W celu skrócenia czasu trwania ćwiczeń piec do austenitowania próbek będzie nagrzany do temperatury około 860°C , a piec z kąpielą solną do temperatury około 340°C .

C. Przebieg ćwiczenia

Po sprawdzeniu przez prowadzącego ćwiczenia stopnia opanowania materiału teoretycznego i znajomości instrukcji bhp oraz dopuszczeniu do wykonywania ćwiczenia, należy wykonać następujące czynności:

1. W oparciu o wykres Fe-Fe₃C określić temperaturę austenitizowania badanych próbek. Porównać otrzymaną temperaturę z temperaturą hartowania odczytaną z kart materiałowych lub norm, przeanalizować ewentualne różnice. Wymaganą temperaturę hartowania ustawić na regulatorze temperatury pieca.
2. Dobrać czas grzania próbek w zależności od wielkości przekroju.
3. Ustalić temperaturę kąpieli solnej do hartowania izotermicznego. Jednocześnie określić czas wytrzymania próbek w kąpieli solnej podczas hartowania stopniowego i izotermicznego. Wymaganą temperaturę kąpieli solnej ustawić na regulatorze temperatury.

Uwaga: Maksymalna temperatura pracy kąpieli solnej (salerzanej) wynosi 450° C, przekroczenie tej temperatury grozi wybuchem.

4. Zbadać twardość próbek przed hartowaniem.
5. Umocować próbki na drutach (oddzielnie), tak aby po nagraniu w piecu można było je łatwo wyjąć. Znakowanie próbek:
 - a/ próbka Nr 1 do hartowania zwykłego,
 - b/ próbka Nr 2 do hartowania stopniowego,
 - c/ próbka Nr 3 do hartowania izotermicznego.
6. Nagrzać próbki w piecu do hartowania i następnie chłodzić.
 - a/ próbkę Nr 1 wyjąć z pieca i zahartować w wodzie. Podczas oziębienia poruszać próbkę ruchem wahadłowym,
 - b/ próbkę Nr 2 przenieść jak najszybciej do kąpieli solnej, wytrzymać przez wymagany okres czasu (najczęściej 10–15 s), a następnie studzić w strumieniu powietrza z wentylatora,
 - c/ próbkę Nr 3 przenieść jak najszybciej do kąpieli solnej, wytrzymać przez okres czasu konieczny do zajścia przemiany bainitycznej (najczęściej 10–15 min.), a następnie studzić w strumieniu powietrza z wentylatora.
7. Po całkowitym ochłodzeniu szlifować dwie przeciwległe powierzchnie próbek na papierach ściernych. Próbki oznaczyć kolejnymi numerami za pomocą elektrografu.
8. Zbadać twardość próbek po hartowaniu.
9. Na otrzymanym wykresie CTPi nanieść krzywe chłodzenia dla poszczególnych rodzajów hartowania oraz podać nazwy otrzymanych struktur.

D. Opracowanie wyników i sprawozdania

Sprawozdanie z badań winno zawierać następujące punkty:

1. Cel badań, przedmiot badań, spis literatury pomocniczej,

2. Uzasadnienie doboru temperatury hartowania i temperatury kąpeli solnej.
3. Dobór czasu grzania oraz czasu wytrzymania w kąpeli solnej podczas hartowania stopniowego i izotermicznego.
4. Krótki opis przebiegu ćwiczenia.
5. Wykreślne przedstawienie w układzie temperatura – czas przeprowadzonych zabiegów cieplnych.
6. Wykres CTPi z naniesionymi krzywymi chłodzenia dla poszczególnych rodzajów hartowania.
7. Tabelaryczne zestawienie wyników pomiarów twardości (HB, HRC lub HV) próbek z podaniem nazwy otrzymanych struktur.
8. Wnioski odnośnie wpływu warunków chłodzenia na strukturę i własności stali.

13.7.2. Hartowanie i odpuszczanie stali

A. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się ze zmianami struktury i własności mechanicznych podczas hartowania i odpuszczania stali.

B. Materiały, i urządzenia do badań

Przedmiotem badań są próbki stalowe o wymiarach $\phi 30 \times 8$ mm wykonane ze stali w gat. 45, 55, 30H, 40H, 20H2M, 30HGS, 35HM, 36HNM, 50S2, WCL, WNL. Próbki do badań w ilości 4 sztuk wręcza prowadzący. Do wykonania ćwiczenia niezbędne są następujące urządzenia i materiały pomocnicze:

- piec elektryczny mufłowy do hartowania i 2 piece do odpuszczania (piece winny być nagrzane wstępnie przed ćwiczeniami),
- twardościomierz Brinella i Rockwella,
- wanny z wodą i olejem,
- rękawice azbestowe, kleszcze kowalskie,
- elektrograf, papiery ściernie,
- karty materiałowe lub normy, odbitki wykresów CTPc dla badanych gatunków stali.

C. Przebieg badań

Po sprawdzeniu przez prowadzącego stopnia opanowania materiału teoretycznego i znajomości instrukcji bhp oraz dopuszczeniu do wykonywania ćwiczenia, należy wykonać następujące czynności:

1. Określić temperaturę hartowania badanych próbek w oparciu o wykres Fe-Fe₃C i porównać z temperaturą zalecaną w kartach materiałowych lub normach, przeanalizować ewentualne różnice. Podgrzać piec do wymaganej temperatury hartowania.
2. Dobrać czas grzania próbek w zależności od wielkości przekroju.
3. Zbadać twardość próbek przed hartowaniem.

4. Nagrząć próbki w piecu do hartowania. Następnie jedną z nich oziębiać w wodzie, dwie w oleju a jedną studzić na powietrzu.
5. Zbadać twardość próbek po hartowaniu.
6. Jedną z próbek zahartowanych w oleju odpuścić w temperaturze 200^o C, a drugą w temperaturze 600^o C. Czas grzania 1 h.
7. Zbadać twardość próbek po odpuszczaniu.
8. Na otrzymanym wykresie CTPc nanieść krzywe prędkości chłodzenia dla zastosowanych ośrodków chłodzących oraz podać nazwy otrzymanych struktur.

D. Opracowanie wyników i sprawozdania

Sprawozdanie z badań winno zawierać następujące punkty:

1. Cel badań, przedmiot badań, spis literatury pomocniczej.
2. Uzasadnienie doboru temperatury hartowania oraz czasu grzania.
3. Krótki opis przebiegu ćwiczenia.
4. Wykreślne przedstawienie w układzie temperatura–czas przeprowadzonych zabiegów cieplnych.
5. Wykres CTPc z naniesionymi krzywymi prędkości chłodzenia dla poszczególnych ośrodków chłodzących.
6. Tabelaryczne zestawienie wyników pomiarów twardości (HB, HRC lub HV) wszystkich próbek z podaniem nazwy otrzymanych struktur.
7. Wykres zmian twardości badanej stali w funkcji temperatury odpuszczania.
8. Wnioski odnośnie wpływu obróbki cieplnej na strukturę i własności stali.

13.7.3. Hartowanie stali szybkoznących

A. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z istotą przemian strukturalnych zachodzących podczas obróbki cieplnej stali szybkoznących.

B. Materiały i urządzenia do badań

Przedmiotem badań są próbki ze stali szybkoznących w gat. SK8M, SW12C, SW18, SW7M, SKC o wymiarach ϕ 30 x 8 mm. Próbki do badań w ilości 2 szt. wręcza prowadzący. Do wykonania ćwiczenia niezbędne są następujące urządzenia i materiały pomocnicze:

- piec elektryczny mufłowy do podgrzewania próbek (nagrzany do temperatury 860^o C),
- piec elektryczny silitowy do dogrzewania próbek (nagrzany do temperatury około 1250^o C),
- piec elektryczny mufłowy do odpuszczania (nagrzany do temperatury 600^o C),
- twardościomierz Brinella i Rockwella,
- wanna z olejem, wentylator,

- rękawice azbestowe, kleszcze kowalskie,
- elektrograf, papiery ściernie,
- karty materiałowe lub normy, odbitki wykresów CTPi dla badanych gatunków stali.

C. Przebieg badań

Po sprawdzeniu przez prowadzącego stopnia opanowania materiału teoretycznego i znajomości instrukcji bhp oraz dopuszczeniu do wykonywania ćwiczenia, należy wykonać następujące czynności:

1. W oparciu o karty materiałowe lub normy dobrać temperaturę austenitzowania badanych próbek. Ustawić wymaganą temperaturę hartowania na regulatorze temperatury pieca silitowego.
2. Zbadać twardość próbek przed hartowaniem.
3. Podgrzać próbki w piecu muflowym do temperatury 860^o C. Czas grzania dobrać w zależności od wielkości przekroju.
4. Przenieść jak najszybciej próbki z pieca muflowego do pieca silitowego i dogrzać w wymaganej temperaturze w ciągu 1–5 min. Czas dogrzewania uzgodnić z prowadzącym ćwiczenia. Następnie jedną próbkę chłodzić w oleju, a drugą w strumieniu powietrza z wentylatora.

Uwaga: Jeśli czas dogrzewania próbek był różny, to obie próbki należy chłodzić w oleju.

5. Zbadać twardość próbek po hartowaniu.
6. Obie próbki odpuścić w temperaturze 600^o C. Czas grzania 1 h.
7. Zbadać twardość próbek po odpuszczaniu.
8. Na wykresie CTPi nanieść krzywe prędkości chłodzenia dla zastosowanych ośrodków chłodzących oraz podać nazwy otrzymanych struktur.

D. Opracowanie wyników i sprawozdania

Sprawozdanie z badań winno zawierać następujące punkty:

1. Cel badań, przedmiot badań, spis literatury pomocniczej.
2. Uzasadnienie doboru temperatury hartowania oraz czasu podgrzewania i dogrzewania próbek.
3. Krótki opis przebiegu ćwiczenia.
4. Wykres przedstawiający pełny cykl obróbki cieplnej zalecanej dla badanego gatunku stali z zaznaczeniem przeprowadzonych zabiegów cieplnych.
5. Wykres CTPi z naniesionymi krzywymi prędkości chłodzenia dla zastosowanych ośrodków chłodzących.
6. Tabelaryczne zestawienie wyników pomiarów twardości (HB, HRC lub HV) próbek z podaniem nazwy otrzymanych struktur.
7. Wnioski odnośnie wpływu warunków obróbki cieplnej na strukturę i własności stali szybkochnących.

Pytania kontrolne

1. Istota i cel obróbki cieplnej.
2. Podstawowe przemiany zachodzące w stalach.
3. Podział stali według ich przeznaczenia.
4. Klasyfikacja zabiegów obróbki cieplnej stali.
5. Przemiany fazowe przechłodzonego austenitu.
6. Zasady sporządzania wykresów CTPi oraz CTPc.
7. Istota przemiany perlitycznej, bainitycznej i martenzytycznej.
8. Krytyczna prędkość chłodzenia.
9. Przyczyny powstawania austenitu szcążkowego.
10. Dobór temperatury hartowania i czasu grzania.
11. Sposoby hartowania.
12. Własności ośrodków chłodzących.
13. Naprężenia przy hartowaniu.
14. Przemiany zachodzące podczas odpuszczania stali.
15. Kruchość odpuszczania.
16. Wpływ dodatków stopowych na przemiany przechłodzonego austenitu.
17. Twardość wtórna.
18. Rodzaje, skład chemiczny i własności stali szybko tnących.
19. Przemiany zachodzące w stalach szybko tnących podczas podgrzewania, wygrzewania, dogrzewania i studzenia.
20. Przemiany w zahartowanej stali szybko tnącej podczas odpuszczania.

Literatura

1. Praca zbiorowa – Metaloznawstwo. Wyd. Śląsk. Katowice 1979
2. Przybyłowicz K. – Metaloznawstwo, Część II. Wyd. AGH, Kraków 1979
3. Wendorff Z. – Metaloznawstwo. WNT, Warszawa 1976
4. Gulajew A. P. – Metaloznawstwo. Wyd. Śląsk, Katowice 1969
5. Prowans S. – Materiałoznawstwo. PWN, Warszawa-Poznań, 1980
6. Żmihorski E. – Stale narzędziowe i obróbka cieplna narzędzi, WNT, Warszawa 1976
7. Praca zbiorowa pod red. W. Lutego – Poradnik inżyniera – Obróbka cieplna stopów żelaza. WNT, Warszawa 1977
8. Jaśkiewicz W. – Transport masy w procesach technologicznych. Zeszyt 5. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 1982
9. Jaśkiewicz W. – Wstęp do ćwiczeń laboratoryjnych z Materiałoznawstwa. Zeszyt 1. Istota twardości. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 1982