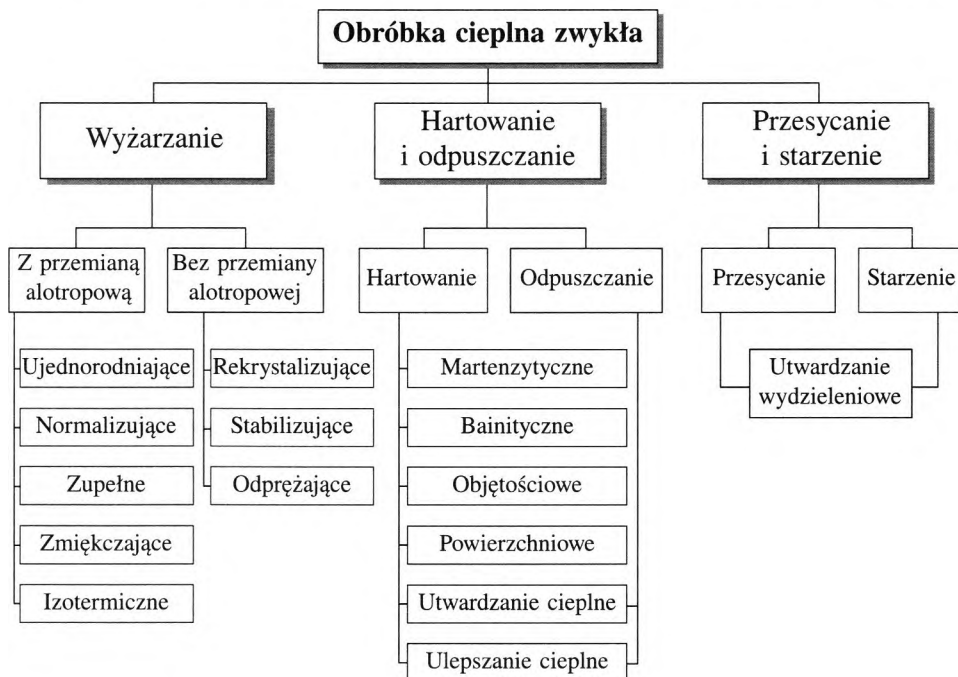


3.3. Obróbka cieplna metali

3.3.1. Rodzaje obróbki cieplnej

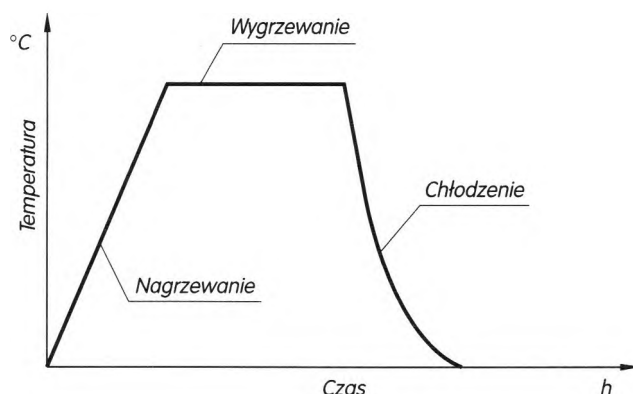
Jest to proces składający się z zabiegów cieplnych, zmierzających do ukształtowania zmian struktury materiału w stanie stałym pod wpływem temperatury i czasu. Rezultatem tych zmian jest uzyskanie wymaganych własności mechanicznych oraz właściwości fizycznych i chemicznych materiału. Obróbkę cieplną, w trakcie której zmiany struktury materiału następują głównie pod wpływem temperatury i czasu, nazywa się **obróbką cieplną zwykłą** (rys. 3.18).



Rys. 3.18. Rodzaje obróbki cieplnej zwykłej [52]

Istnieją przypadki łączenia obróbki cieplnej z działaniem środowiska chemicznego, odkształceniami plastycznymi lub oddziaływaniem pola magnetycznego. Wówczas mamy do czynienia odpowiednio z: obróbką cieplno-chemiczną, cieplno-plastyczną i cieplno-magnetyczną. Główne zabiegi obróbki cieplnej to: nagrzewanie, wygrzewanie i chłodzenie (rys. 3.19).

Istnieje ścisły związek obróbki cieplnej z przemianami fazowymi, właściwymi dla danego rodzaju stopu. Dlatego rodzaj obróbki cieplnej oraz wartości temperatury ustala się na podstawie wykresów równowagi fazowej stopów, np. w przypadku stali na podstawie wykresu równowagi fazowej żelazo-cementyt. Stosowanie poszczególnych rodzajów obróbki cieplnej (hartowania i odpuszczania, przesycania i starzenia) wymaga nagrzewania stopu

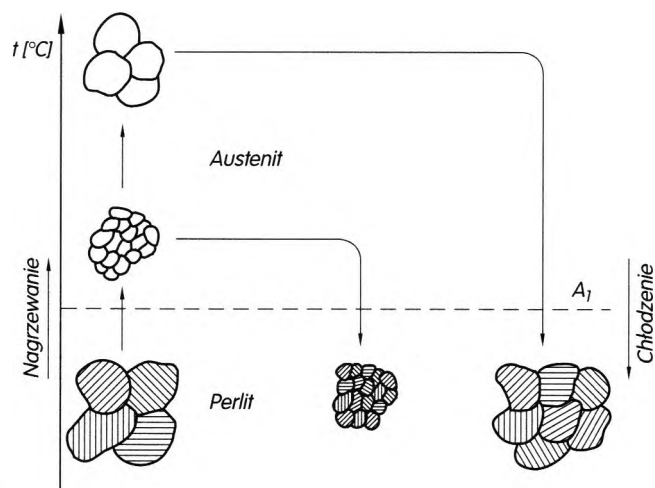


Rys. 3.19. Podstawowe zabiegi obróbki cieplnej

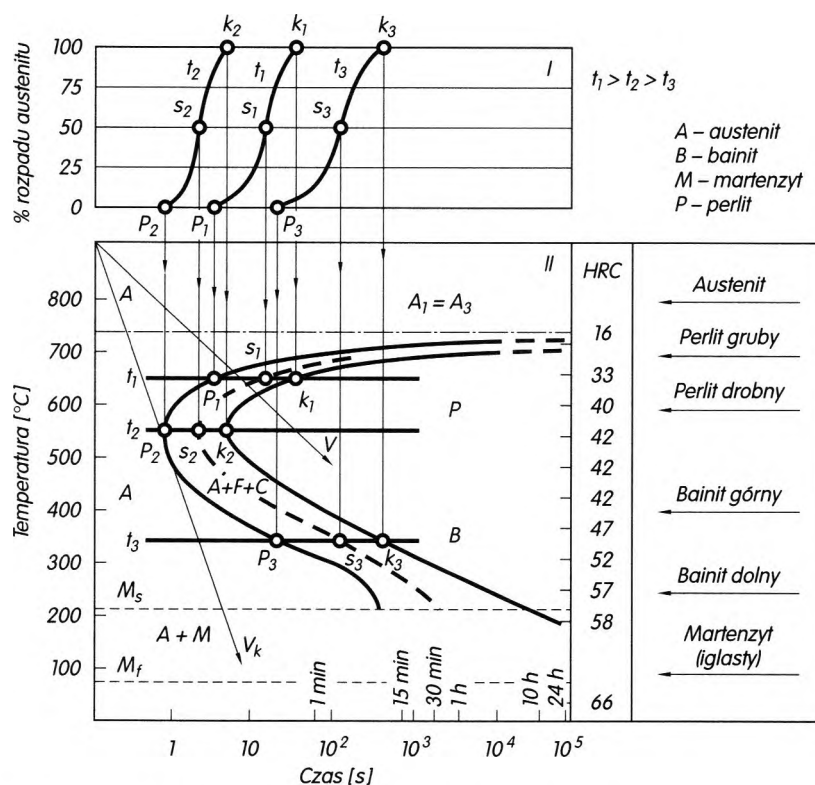
do temperatur, w których następują przemiany alotropowe lub zmiany rozpuszczalności określonych składników stopu. Do obróbki cieplnej stali wykorzystuje się układ żelazo-cementyt, na którego wykresie temperatury równowagi faz i temperatury przemian są oznaczone literą *A* z odpowiednimi wskaźnikami (patrz rys. 3.10 i 3.12).

Temperatura równowagi austenitu z ferrytem i cementytem (linia *PSK*) jest oznaczona A_1 , temperatura przemiany magnetycznej ferrytu (linia *MO*) – A_2 , graniczna temperatura równowagi austenitu z ferrytem (linia *GSK*) – A_3 , a graniczna temperatura równowagi austenitu z cementytem wtórnym (linia *SE*) – A_{cm} . W celu odróżnienia początku i końca przemian do litery *A* dodaje się wskaźnik *c* w przypadku nagrzewania oraz wskaźnik *r* przy chłodzeniu (patrz rys. 3.10).

Jednym z ważniejszych zabiegów obróbki cieplnej stali jest jej nagrzewanie powyżej temperatury A_{c1} i wygrzewanie w celu wytworzenia struktury austenitu przed chłodzeniem (rys. 3.20). Zabieg ten nazwa się **austenityzowaniem**. Po przekroczeniu temperatury A_{c1} następuje przemiana, w której nowo powstałe ziarna austenitu są bardzo drobne w porównaniu z ziarnami perlitu. Dalsze nagrzewanie lub wygrzewanie powoduje niekorzystny rozrost ziaren. Istnieją dwa typy stali: gruboziarniste i drobnoziarniste. Stale gruboziarniste mają skłonność do rozrostu ziaren po niewielkim przekroczeniu temperatury A_{c1} , drobnoziarniste nie wykazują takiej skłonności; rozrost ziaren następuje dopiero po nagrzaniu stali do temperatury ok. 1000 °C. Rozrost ziaren jest cechą niekorzystną, gdyż powoduje zmniejszenie wytrzymałości (szczególnie zmęzeniowej) i udurowienia stali. Chłodzenie stali po procesie austenityzowania poniżej temperatury A_{r1} powoduje przemianę austenitu w struktury perlityczne, bainityczne lub martenzytyczne, zależnie od temperatury, rodzaju i przebiegu przemiany oraz szybkości chłodzenia. Przebieg procesu jest reprezentowany zwykle na wykresach rozpadu austenitu, zwanych wykresami CTP (czas, temperatura, przemiana – rys. 3.21).



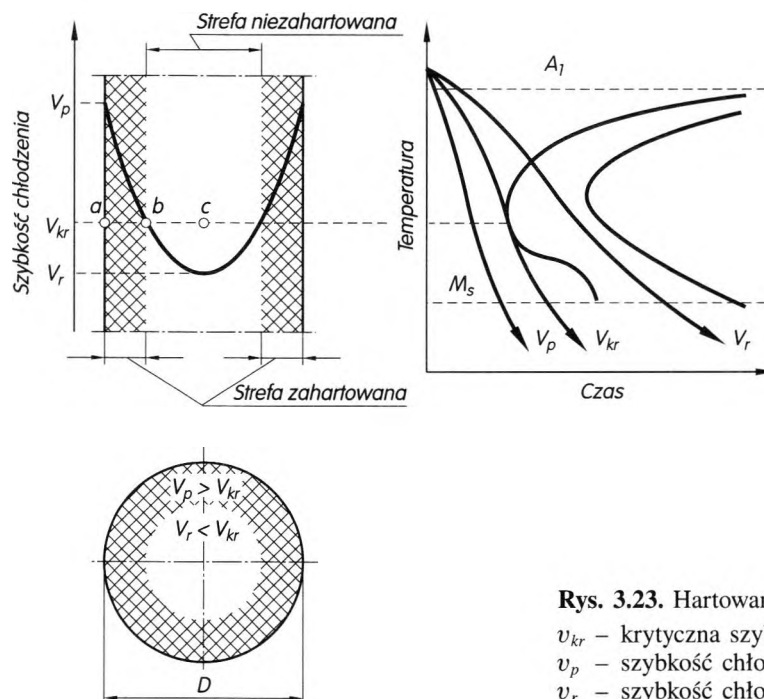
Rys. 3.20. Przebieg zmian wielkości ziarn stali eutektoidalnej w czasie nagrzewania i efekty chłodzenia



Rys. 3.21. Wykres CTP izotermicznych przemian austenitu stali eutektoidalnej [5]

przedmiotu w kąpeli solnej o temperaturze nieco wyższej od M_s , ochłodzeniu jego objętości do temperatury kąpeli i następnie chłodzeniu w powietrzu. **Hartowanie bainityczne** z przemianą izotermiczną polega na chłodzeniu w kąpeli solnej do temperatury bliskiej, lecz nieco wyższej od M_s oraz wytrzymaniu w tej temperaturze do zakończenia przemiany bainitycznej, a następnie chłodzeniu w powietrzu. Zapewnia to zmniejszenie naprężeń cieplnych i uzyskanie dużej udułności.

Wyróżnia się również **hartowanie objętościowe** (na wskroś) i powierzchniowe. Zahartowanie na wskroś przedmiotów o dużych przekrojach nie jest możliwe, ponieważ szybkość chłodzenia na powierzchni jest większa niż w środku materiału, gdzie może być ona mniejsza od krytycznej (rys. 3.23). **Hartowanie powierzchniowe** polega na szybkim nagrzaniu warstwy powierzchniowej o niewielkiej grubości do temperatury austenitacji i chłodzeniu z dużą szybkością, zapewniającą uzyskanie struktury martenzytycznej w tej warstwie. Celem jest uzyskanie wysokiej twardości warstwy powierzchniowej i odporności na ścieranie przy zachowaniu ciągliwości rdzenia. Ze względu na sposób nagrzewania powierzchni wyróżnia się następujące rodzaje hartowania powierzchniowego: płomieniowe, indukcyjne, kąpielowe, oporowe lub kontaktowe, elektrolityczne, laserowe, elektronowe i plazmowe. Części maszyn wymagające wysokiej wytrzymałości poddaje się najpierw ulepszaniu cieplnemu, tj. hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu, a następnie określone fragmenty części hartuje się



Rys. 3.23. Hartowanie pręta stalowego
 v_{kr} – krytyczna szybkość chłodzenia,
 v_p – szybkość chłodzenia powierzchni,
 v_r – szybkość chłodzenia rdzenia

powierzchniowo. Hartowanie powierzchniowe stosuje się dla stali niestopowych zawierających $0,4 \div 0,6\%$ C, a dla stali niskostopowych o zawartości $0,3 \div 0,6\%$ C.

Własności stali zahartowanej określają dwie cechy: hartowność i utwardzalność. **Utwardzalność** to zdolność stali do utwardzania się przy hartowaniu. Miarą utwardzalności jest maksymalna twardość mierzona na powierzchni. Twardość zależy od ilości węgla i rośnie do zawartości ok. $0,9\%$ C. **Hartowność** określa głębokość, na jaką stal daje się zahartować. Miarą hartowności jest głębokość strefy zahartowanej. Głębokość warstwy zahartowanej określa się od powierzchni zewnętrznej do początku strefy, której struktura składa się z 50% martenzytu. Po hartowaniu martenzytycznym stale konstrukcyjne wykazują duże naprężenia własne i strukturalne oraz małą plastyczność, co uniemożliwia ich bezpośrednie użycie. W celu zmniejszenia tych niekorzystnych skutków stosuje się odpuszczanie.

Odpuszczanie jest operacją obróbki cieplnej stosowaną po hartowaniu, polegającą na nagrzanu przedmiotu poniżej temperatury A_{c1} , wygrzaniu i następnie chłodzeniu. Temperatura nagrzewania i czas wygrzewania zależą od rodzaju stali i celu odpuszczania. Odpuszczanie może być: niskie, średnie i wysokie. **Odpuszczanie niskie** polega na nagrzanu przedmiotu do temperatury $150 \div 200^\circ\text{C}$ i następnie chłodzeniu. Celem procesu jest usunięcie naprężeń hartowniczych przy zachowaniu dużej twardości i odporności na ścieranie. **Odpuszczanie średnie** przeprowadza się w zakresie temperatur $200 \div 500^\circ\text{C}$. Celem jest uzyskanie dużej wytrzymałości i sprężystości stali przy dość znacznym obniżeniu twardości. **Odpuszczanie wysokie** przebiega powyżej temperatury 500°C , lecz poniżej A_{c1} . Jego celem jest uzyskanie możliwie największej udarnośći, zwiększenie stosunku granicy plastyczności do granicy wytrzymałości $\frac{R_e}{R_m}$ oraz prawie całkowite usunięcie naprężeń hartowniczych. Temperatura i czas odpuszczania zależą od wymaganych własności.

Przesykanie jest operacją obróbki cieplnej polegającą na nagrzanu materiału do temperatury powyżej granicznej rozpuszczalności, w której wydzielony składnik przechodzi do roztworu stałego, wygrzaniu w tej temperaturze i ochłodzeniu w celu zatrzymania rozpuszczonego składnika w roztworze przesyconym.

Starzenie polega na nagrzanu i wytrzymaniu uprzednio przesyconego materiału w temperaturze znacznie niższej od temperatury granicznej rozpuszczalności w celu wydzielenia składnika lub składników o odpowiednim stopniu dyspersji, które znajdują się w nadmiarze w przesyconym roztworze stałym. Przesykanie i starzenie nazywa się **utwardzaniem dyspersyjnym**.

3.3.2. Piece do pełnej obróbki cieplnej

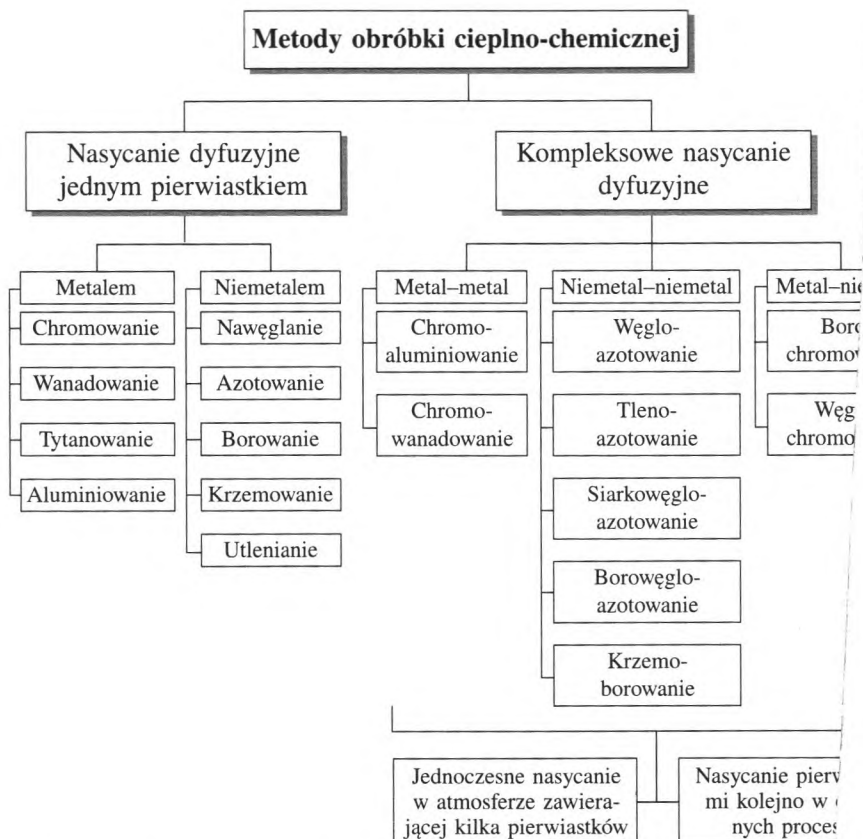
Nowoczesne piece do pełnej obróbki cieplnej to niezależne urządzenia w kształcie walczaka z otwieranym, dobrze uszczelnionym dnem oraz sterowaniem komputerowym. Pełna obróbka cieplna oznacza, że w tym samym piecu odbywa się nagrzewanie, wygrzewanie, szybkie chłodzenie i studzenie części. Wymiary zewnętrzne pieca zależą od masy wsadu (200, 500 kg). Załadunek części odbywa się na paletach, dostosowanych do wymiarów i kształtu części. Przed obróbką cieplną przedmioty muszą być dokładnie umyte (np. w mieszance C153) i wysuszone (na paletach). Stosuje się dwa rodzaje nagrzewania. Części, których procesy obróbki cieplnej wymagają temperatury do 800 °C, nagrzewa się przez konwekcję w gazie obojętnym, najczęściej w azocie, pod ciśnieniem 1 MPa. Elementy, których procesy obróbki cieplnej wymagają temperatur 800÷1300 °C, nagrzewa się wskutek promieniowania cieplnego w próżni osiągającej 10^{-5} MPa. Piece są ogrzewane elektrycznie za pomocą pierścieniowych grzałek grafitowych, równomiernie rozmieszczonych na obwodzie pieca (np. moc pieca o wsadzie 200 kg wynosi 95 kW · h). Szybkie chłodzenie odbywa się w azocie gazowym, który jest dostarczany w stanie ciekłym o strumieniu 40 l/s. Zewnętrzny płaszcz pieca jest chłodzony wodą o strumieniu 20 m³/h. Oprogramowanie komputerowe umożliwia zadanie pełnego cyklu obróbki cieplnej, zapewniającego uzyskanie parametrów (twardości, gradientu twardości itp.) określonych w warunkach technicznych. Są to:

- czas nagrzewania do wymaganej temperatury w °C (lub szybkość nagrzewania w °C/min),
- czas wygrzewania w określonej temperaturze,
- temperatura i czas chłodzenia,
- temperatura i czas studzenia.

Po zaprogramowaniu pełnego cyklu obróbki cieplnej na monitorze komputera ukazują się zadane parametry, a w trakcie procesu na bieżąco są wyświetlane parametry dotyczące danej chwili. Części maszyn po obróbce cieplnej mają czystą, srebrzystą powierzchnię, bez nalotów.

3.4. Obróbka cieplno-chemiczna

Obróbka cieplno-chemiczna stali polega na wygrzewaniu stali w określonym środowisku chemicznym w celu dyfuzyjnego wprowadzenia obcego pierwiastka (a nawet dwóch lub trzech pierwiastków – rys. 3.24) do warstwy przypowierzchniowej przedmiotu. Celem dyfuzyjnego wprowadzenia pierwiastków do warstwy przypowierzchniowej jest uzyskanie określonych, korzystnych właściwości użytkowych, np. wysokiej twardości warstwy wierzchniej części przy zachowaniu ciągliwości rdzenia, wysokiej odporności na ścieranie, zmniejszenie współczynnika tarcia, podwyższenia odporności na korozję.



Rys. 3.24. Metody obróbki cieplno-chemicznej z uwzględnieniem rodzaju pierwiastka [52]

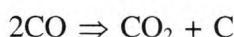
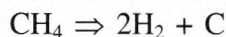
Obróbkę cieplno-chemiczną dzieli się na:

- dyfuzyjne nasycanie niemetalami: nawęglanie, azotowanie, siarkowanie, utlenianie, borowanie, krzemowanie;
- dyfuzyjne nasycanie metalami: aluminiowanie, chromowanie, wanadowanie, tytanowanie;
- dyfuzyjne nasycanie wieloskładnikowe: węglonitrowanie, tlenonitrowanie, węglotytanowanie, siarkowęgloazotowanie.

Obróbka cieplno-chemiczna w zależności od rodzaju pierwiastka może przebiegać w środowisku stałym, ciekłym lub gazowym bogatym w pierwiastek dyfundujący do stali. Często jest to gazowe, w którym mogą zachodzić procesy: dysocjacji, adsorpcji. W ich wyniku powstaje warstwa dyfuzyjna, wykazująca największe stężenie dyfundującego pierwiastka na powierzchni. Stężenie to maleje z zwiększeniem głębokości warstwy przypowierzchniowej.

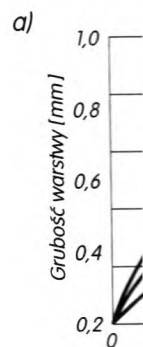
Zespół operacji polegający na nawęglaniu, hartowaniu i niskotemperaturowym nasycaniu nazywa się **węgloutwardzaniem cieplnym**. Wynikiem tego procesu jest powstanie warstwy twardości.

jest otrzymanie odpornej na ścieranie warstwy powierzchniowej o twardości 60÷64 HRC, z zachowaniem ciągliwości rdzenia o twardości 25÷35 HRC. W produkcji jednostkowej i małoseryjnej stosuje się nawęglanie w proszkach, w produkcji masowej – nasycanie gazowe. Nawęglanie w proszkach przeprowadza się w temperaturze 900÷950 °C w szczelnie zamkniętych żaroodpornych skrzynkach, wypełnionych węglem drzewnym z intensyfikatorami (np. BaCO₃, Na₂CO₃). Proces jest długotrwały i nie można go w pełni kontrolować. Nawęglanie gazowe polega na wygrzewaniu przedmiotów w komorach pieca, przez które przepływa gaz nawęglający (np. ziemny, świetlny, generatorowy, koksowniczy). Najsilniej działający jest gaz ziemny, który stosuje się z produktami niezupełnego spalania gazu ziemnego, otrzymując główne składniki mieszaniny (nietworzącej sadzy): CH₄, CO i N₂. W temperaturze nawęglania 900÷950 °C zachodzą reakcje



w wyniku których powstaje węgiel dyfundujący do stali. Stężenie węgla C w warstwie przypowierzchniowej stali można regulować od wartości 1,2÷1,3% do wartości stężenia węgla w stali nienawęglonej. Powierzchnie nienawęglane zabezpiecza się przez galwaniczne pokrywanie miedzią lub za pomocą specjalnych past złożonych z glinki, boraksu, szkła wodnego itp. Głębokości warstw nawęglonych wynoszą 0,6÷2 mm. Stale niestopowe do nawęglania zawierają 0,1÷0,25% C, a stale niskostopowe 0,07÷0,24% C. Po nawęglaniu należy przeprowadzić właściwy proces hartowania z niskim odpuszczaniem. Twardość po nawęglaniu zostaje zachowana przy odpuszczaniu do ok. 200 °C.

Azotowanie jest dyfuzyjnym procesem nasycania stali w warstwie przypowierzchniowej. Istnieją dwa rodzaje azotowania: utwardzające i przeciwkorozyjne. Azotowaniu poddaje się specjalne stale stopowe po ulepszeniu cieplnym, tj. hartowaniu i wysokim odpuszczaniu. Stale te mają temperaturę odpuszczania wyższą od temperatury azotowania utwardzającego. Pierwiastki stopowe tych stali tworzą trwałe azotki zapewniające zachowanie bardzo wysokiej twardości (900÷1200 HV) podczas długotrwałej pracy w temperaturze do ok. 500 °C oraz odporność na ścieranie (rys. 3.25). Inne stale poddaje się azotowaniu w celu wytworzenia warstwy antykorozyjnej lub zwiększeniu wytrzymałości zmęczeniowej. Proces azotowania utwardzającego przebiega najczęściej w temperaturze 500÷520 °C w ciągu 10÷100 godzin. W praktyce grubości warstw azotowanych wynoszą 0,1÷0,6 mm. Maksymalna twardość występuje na głębokości ok. 0,05 mm. Azotowanie przeciwkorozyjne wykonuje się w temperaturze 600÷700 °C w ciągu 0,5 do kilku godzin w celu uzyskania bardzo szczelnej umiarkowanie twardej warstwy o dobrej odporności na korozję i grubości do 0,02 mm, a nawet do 0,04 mm. Azotowanie odbywa się w komorach,

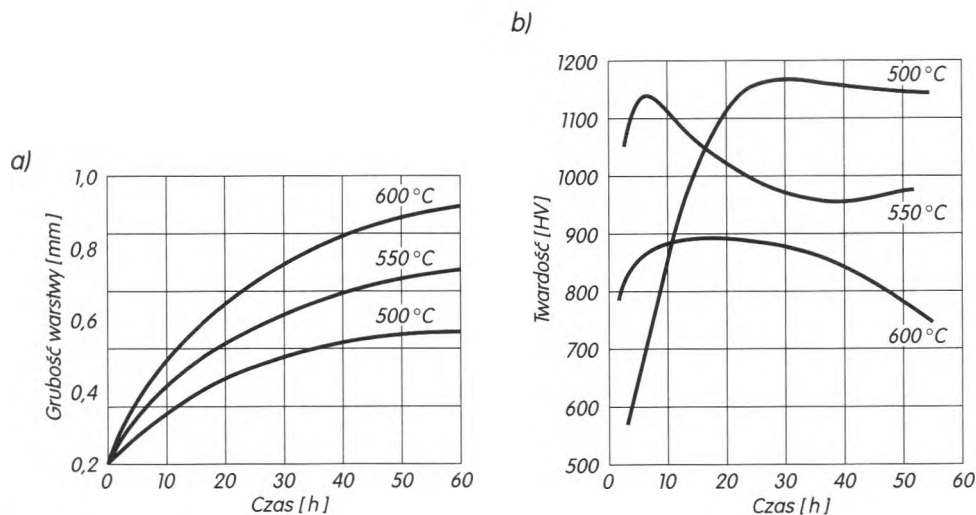


Rys. 3.25. a) twardość

do których 480÷600 ° atomowy przypowie Proces przypowie minuje dy węglazot proces az azotowęgi Nasyc dyfuzyjne kłych (roz cych). Pr 1000÷120

Pytania i

1. W ja
2. Wymi
- uzysk
3. Omów
4. Prze



Rys. 3.25. Wpływ temperatury i czasu azotowania na: a) grubość warstwy azotowanej, b) twardość warstwy azotowanej [5]

do których doprowadza się amoniak. Podczas procesu w temperaturze 480÷600 °C zachodzi dysocjacja wg reakcji: $\text{NH}_3 \Rightarrow 3\text{H} + \text{N}$. Powstający azot atomowy jest pochłaniany przez powierzchnię i dyfunduje w głąb warstwy przypowierzchniowej stali.

Proces jednoczesnego nasycania dyfuzyjnego azotem i węglem warstw przypowierzchniowych nazywa się **azotonawęglaniem**, podczas którego dominuje dyfuzja węgla. Jednoczesne nasycanie węglem i azotem nazywa się **węgloazotowaniem**, podczas którego dominuje dyfuzja azotu. Natomiast proces azotonawęglania, hartowania i niskiego odpuszczania nazywa się **azotowęglooutwardzaniem**.

Nasycanie warstw przypowierzchniowych stali metalami odbywa się poprzez dyfuzyjne metalizowanie w ośrodkach stałych (sproszkowane żelazostopy), ciekłych (roztopiony metal nasycający) lub gazowych (chlorki metali nasycających). Proces metalizowania dyfuzyjnego odbywa się w temperaturze 1000÷1200 °C w stosunkowo długim czasie.

Pytania i zadania

1. W jakim celu stosuje się metody zwykłej obróbki cieplnej?
2. Wymień cechy różniące podstawowe rodzaje obróbki cieplnej oraz omów uzyskiwane efekty.
3. Omów metody obróbki cieplno-chemicznej i jej zalety użytkowe.
4. Przedstaw budowę nowoczesnych pieców do obróbki cieplnej i ich zalety.