

OBRÓBKA CIEPLNA STOPÓW ŻELAZA

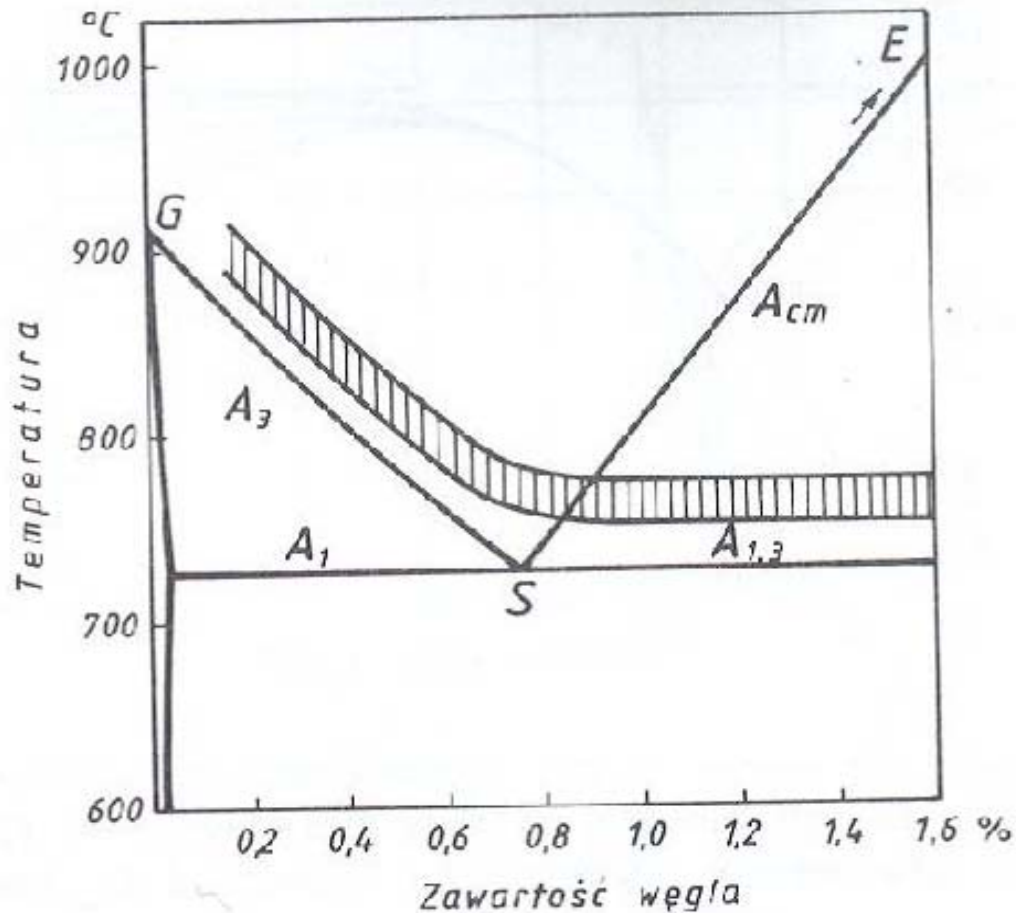
Cz. III. Hartowanie i odpuszczanie, obróbka cieplno-chemiczna

HARTOWANIE, SPOSOBY HARTOWANIA

Hartowanie jest obróbką cieplną polegającą na nagrzaniu stali do temperatur występowania austenitu $>A_{c1,3}$, wygrzaniu – czyli austenitzowaniu i oziębieniu w celu uzyskania struktury martenzytycznej lub bainitycznej.

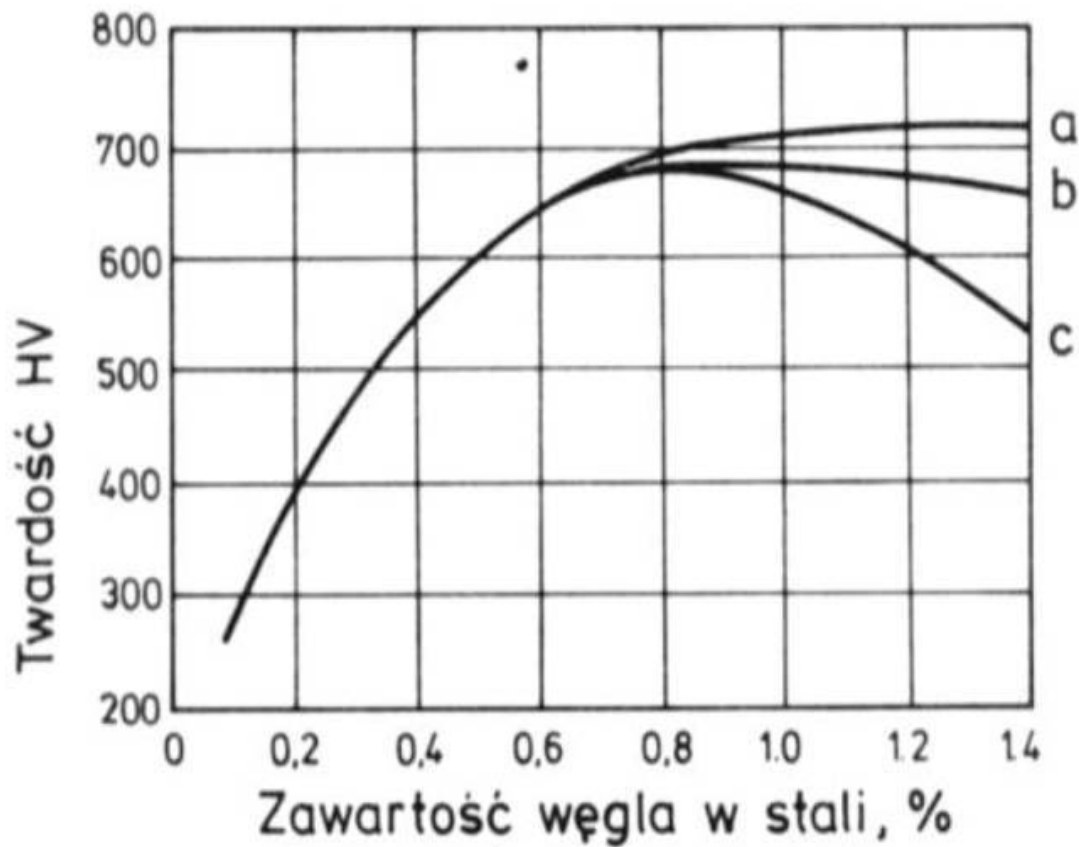
W celu uzyskania poprawnych wyników hartowania, konieczne jest dotrzymanie odpowiednich parametrów, do których należą:

- **temperatura austenitzowania**
- **czas grzania**
- **szybkość chłodzenia**



Rys. 10.13. Fragment wykresu równowagi Fe-Fe₃C z naniesionym pasmem prawidłowych temperatur hartowania

Temperatura austenitzowania zależy od składu chemicznego stali, głównie od zawartości węgla. Po hartowaniu na martenzyt, w stalach podutektoidalnych występuje oprócz martenzytu austenit szczątkowy (nieprzemieniony), a w stalach nadeutektoidalnych – austenit szczątkowy i cementyt.



Rys. 7.6. Wpływ zawartości węgla w stali zahartowanej na martenzyt na: a – twardość martenzytu, b – twardość stali zahartowanej z temperatury właściwej – $Ac_3 + 30 \div 50^\circ C$ lub $Ac_1 + 30 \div 50^\circ C$, c – twardość stali nadeutektoidalnej zahartowanej z temperatury wyższej od Ac_{cm}

Czas grzania zależy od:

- składu chemicznego stali
- wymiarów przedmiotu
- warunków nagrzewania, rodzaju pieca, ośrodka grzewczego

Szybkość chłodzenia zależy od rodzaju ośrodka chłodzącego.

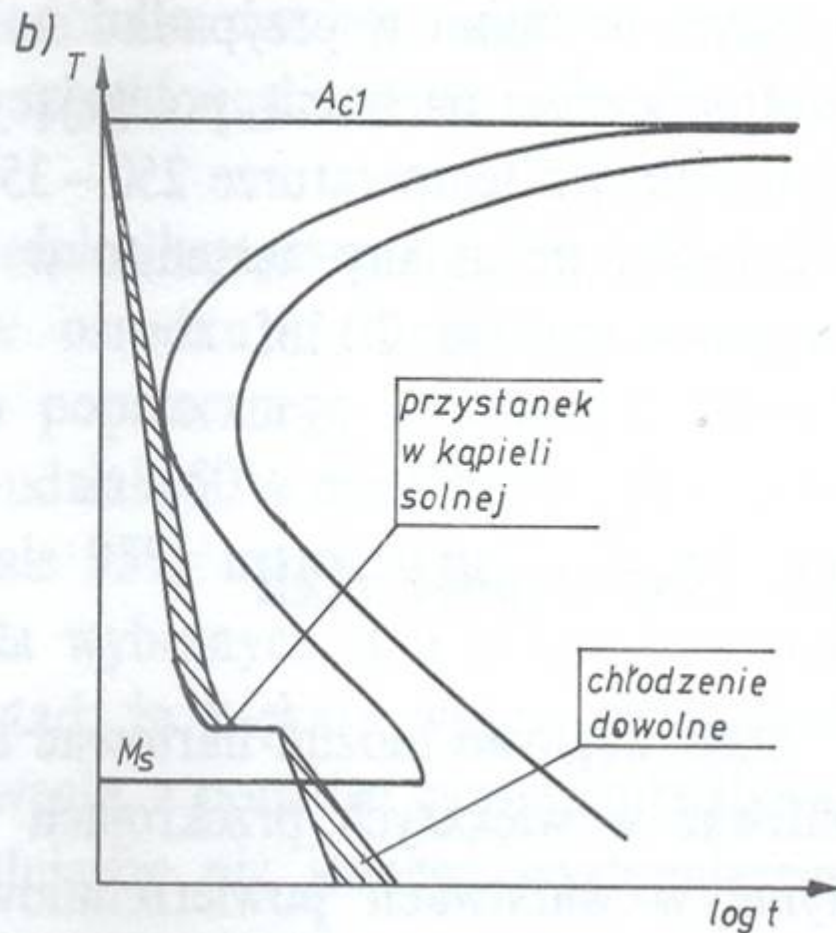
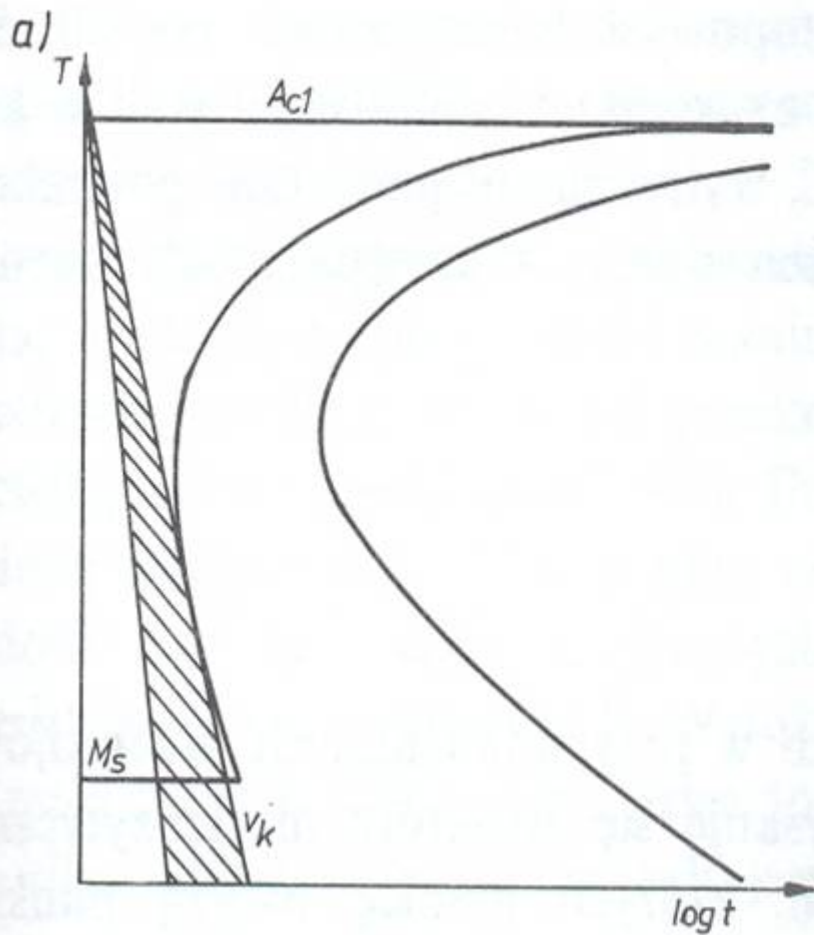
Najintensywniejszymi ośrodkami chłodzącymi są woda i wodne roztwory chlorków, a ośrodkami łagodnie hartującymi – oleje, sprężone powietrze.

Przy doborze kąpieli hartowniczych należy kierować się zasadą, aby szybkość chłodzenia była wystarczająca dla wywołania planowanych przemian, jednak nie nadmiernie duża, aby nie wprowadzić zbyt dużych naprężeń hartowniczych, które mogą być przyczyną samoistnego pęknięcia i odkształcania przedmiotów.

Naprężenia hartownicze są sumą naprężeń cieplnych i strukturalnych. Naprężenia cieplne spowodowane są nierównomiernym stygnięciem stali na przekroju elementu, strukturalne wynikają z nierównomiernych przemian austenitu na przekroju, czyli nierównomiernych zmian gęstości.

Hartowanie martenzytyczne zwykle polega na ciągłym chłodzeniu w jednym ośrodku; w wypadku stali węglowych jest nim woda. Jest to najłatwiejszy sposób hartowania, ale wywołujący największe naprężenia hartownicze. Obniżenie naprężeń jest możliwe dzięki złożonym sposobom chłodzenia w hartowaniu:

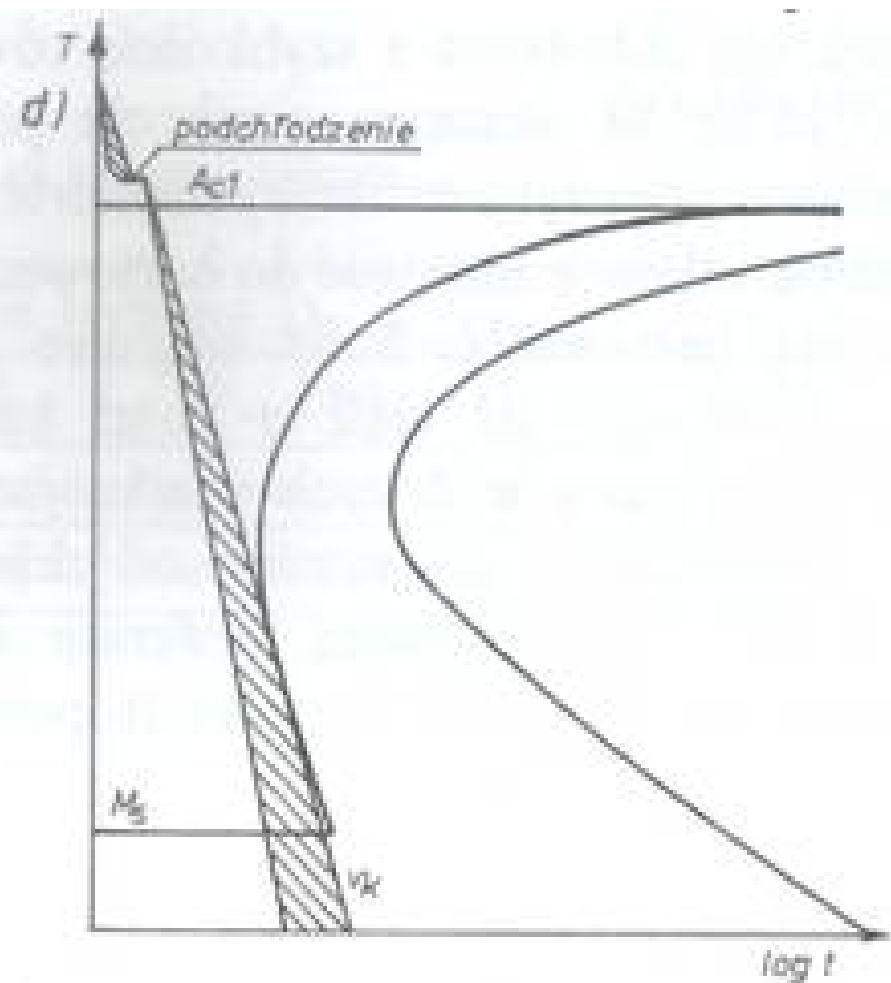
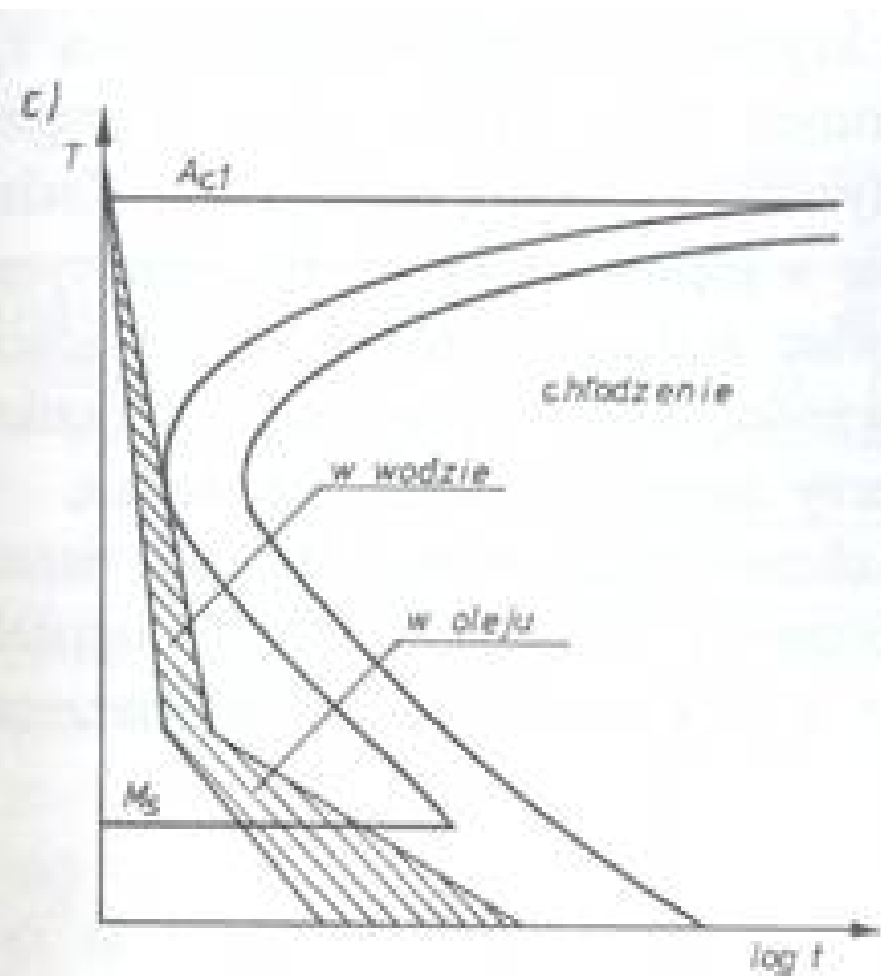
- stopniowym
- z podchłodzeniem
- ciągłym na bainit
- izotermicznym na bainit



a) hartowanie zwykłe martenzytyczne (chłodzenie ciągłe)

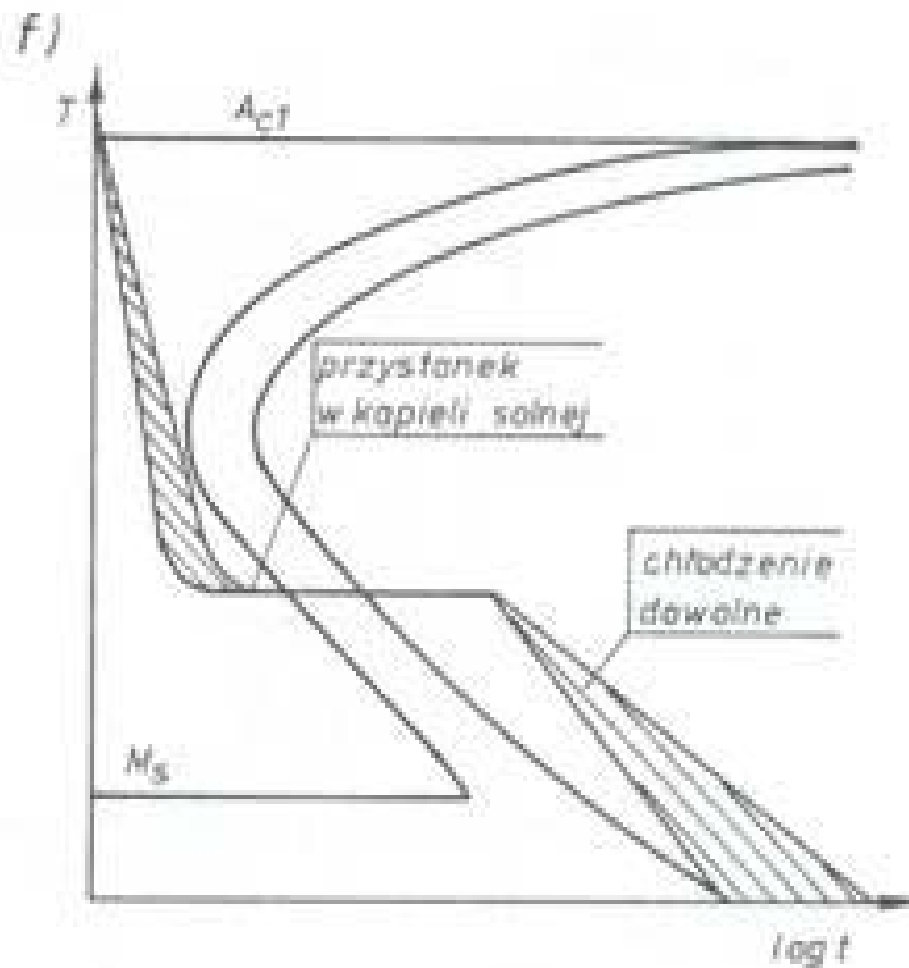
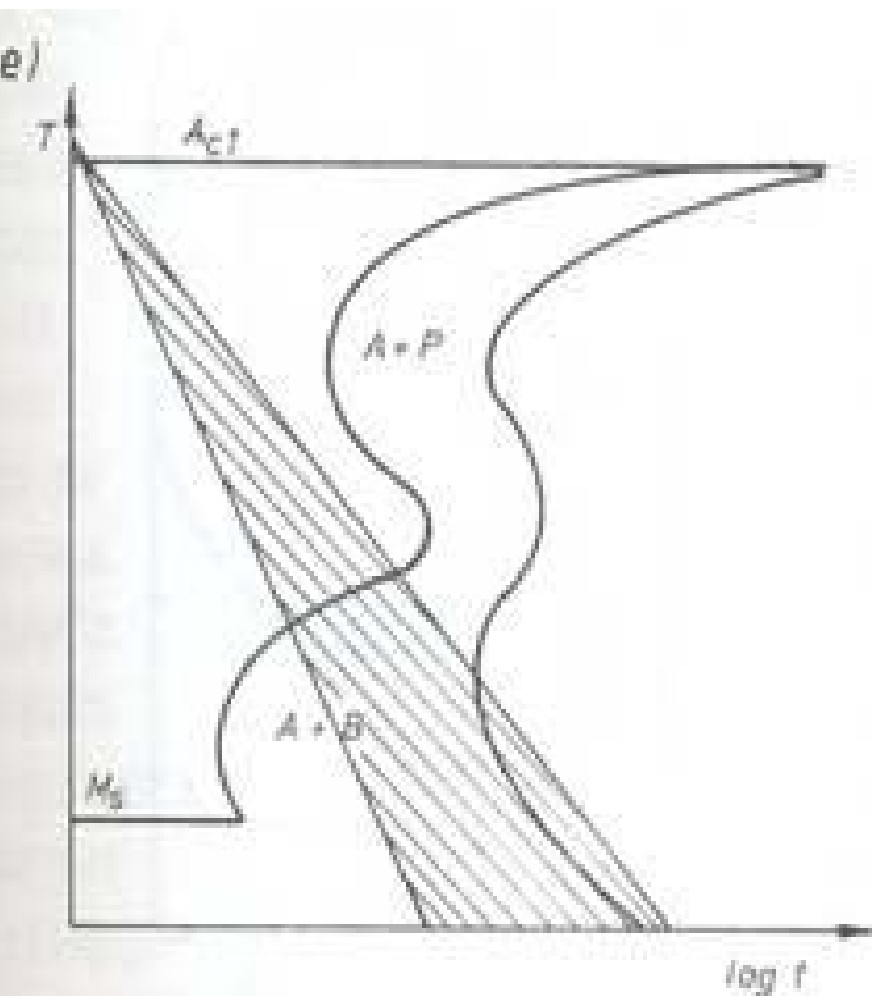
b) hartowanie stopniowe

V_k – **krytyczna szybkość chłodzenia**, tj. najmniejsza szybkość chłodzenia, przy której austenit ulega przemianowi w martenzyt



c) Harowanie stopniowe

d) Hartowanie z podchłodzeniem z temperatury autenizacji

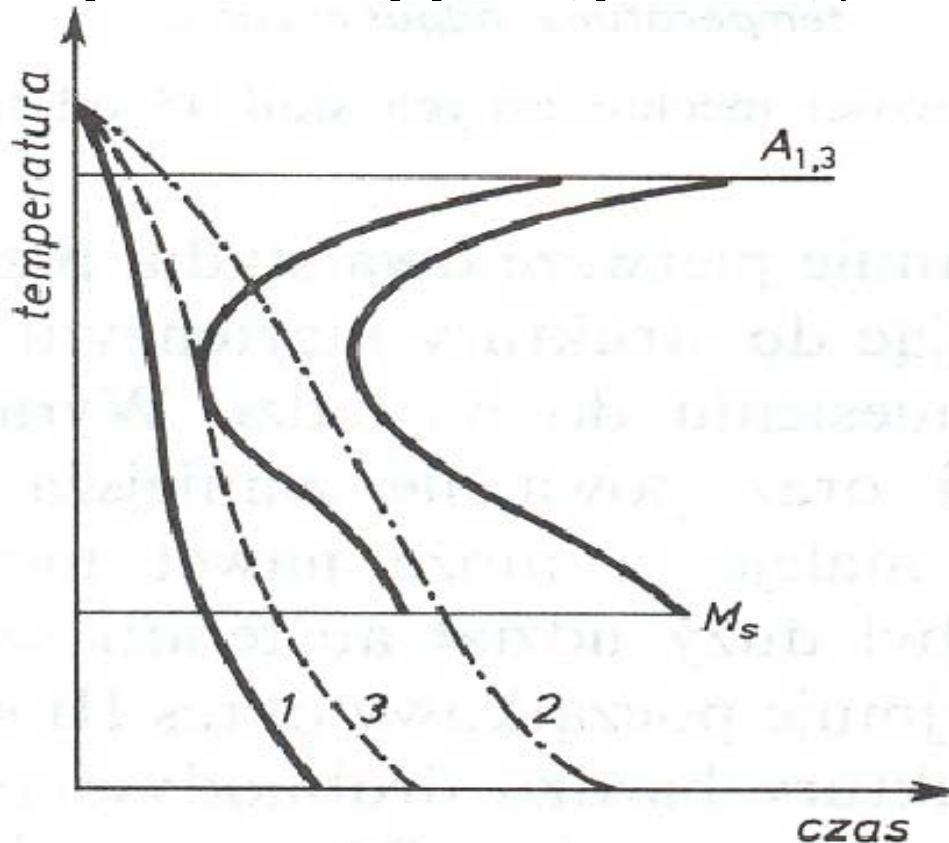


e) Hartowanie zwykłe bainityczne

f) Hartowanie izotermiczne na bainit

HARTOWNOŚĆ STALI

Stale węglowe można hartować tylko w wypadku małych przekrojów, ponieważ w większych przekrojach uzyskuje się strukturę martenzytyczną jedynie w warstwach wierzchnich, których granicę stanowią obszary przekroju chłodzone z szybkością równą krytycznej szybkości chłodzenia. Bliżej środka pręta wystąpią struktury niemartenzytyczne, jak bainit, perlit, ferryt.



Szybkość chłodzenia: 1 – na powierzchni, 2 – w osi przekroju, 3 – krytyczna szybkość chłodzenia

Cechą stali określającą zdolność do hartowania się w głąb na strukturę martenzytyczną jest **hartowność**.

Hartowność zależy od składu chemicznego stali, wielkości ziarna austenitu, jednorodności austenitu, obecności nierozpuszczonych cząstek innych faz.

Stale węglowe mają niską hartowność. Hartowność zwiększa węgiel i dodatki stopowe (oprócz kobaltu) rozpuszczone w austenicie, podobnie działają większe ziarna i jednorodność austenitu. Nierozpuszczone cząstki tlenków, węglików i azotków zmniejszają hartowność.

Jako miarę hartowności stosuje się tzw. średnicę krytyczną D_k ; jest to średnica pręta, w którym przy zahartowaniu w ośrodku o określonej zdolności chłodzącej uzyskuje się w osi przekroju poprzecznego strukturę o udziale martenzytu nie mniejszym niż 50%. Np. D_{50} – udział martenzytu 50%, D_{95} – udział martenzytu 95%.

Hartowność jest jedną z najważniejszych właściwości użytkowych stali, stanowi główne kryterium doboru stali konstrukcyjnych na części maszyn ulepszone cieplnie (hartowane i odpuszczane).

Jeżeli dany element konstrukcyjny ze względu na wymagane właściwości mechaniczne musi być w stanie ulepszonym cieplnie, to należy tak dobrać materiał, aby największa średnica elementu była zbliżona do D_{95} – jeżeli wymagana jest wysoka granica sprężystości, lub do D_{50} – gdy wymagana jest większa plastyczność.

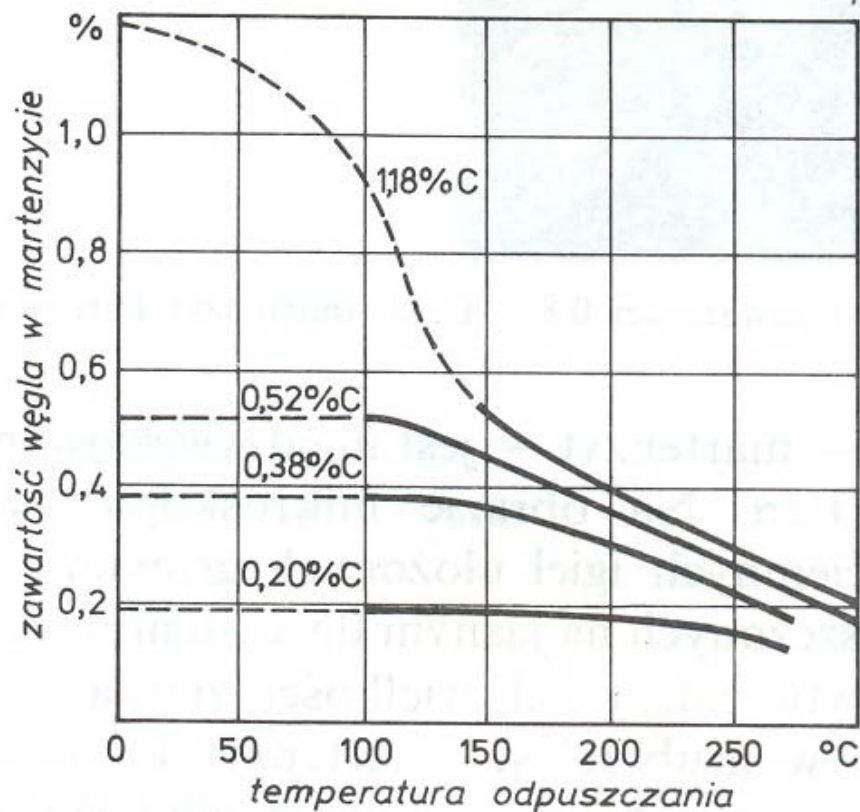
PRZEMIANY ZAHARTOWANEJ STALI PODCZAS NAGRZEWANIA

Produkty przemiany martenzytycznej – martenzyt i austenit szczytkowy są nietrwałe. Nietrwałość martenzytu spowodowana jest znacznym przesyleniem węglem i zdefektowaniem sieci. Nietrwałość austenitu szczytkowego wynika z nadmiaru energii swobodnej.

Powrót do stanu równowagi wymaga aktywacji cieplnej w celu uruchomienia dyfuzji. Podczas nagrzewania martenzytu ma miejsce szereg procesów, aż do osiągnięcia stanu równowagi.

Stadia przemian

1. 80-200°C: wydzielanie z martenzytu nadmiaru węgla w postaci cienkich płytek metastabilnego węgla ϵ o składzie Fe_2C – $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$. Zanika częściowo tetragonalne zniekształcenie sieci (kończy się w 400°C).



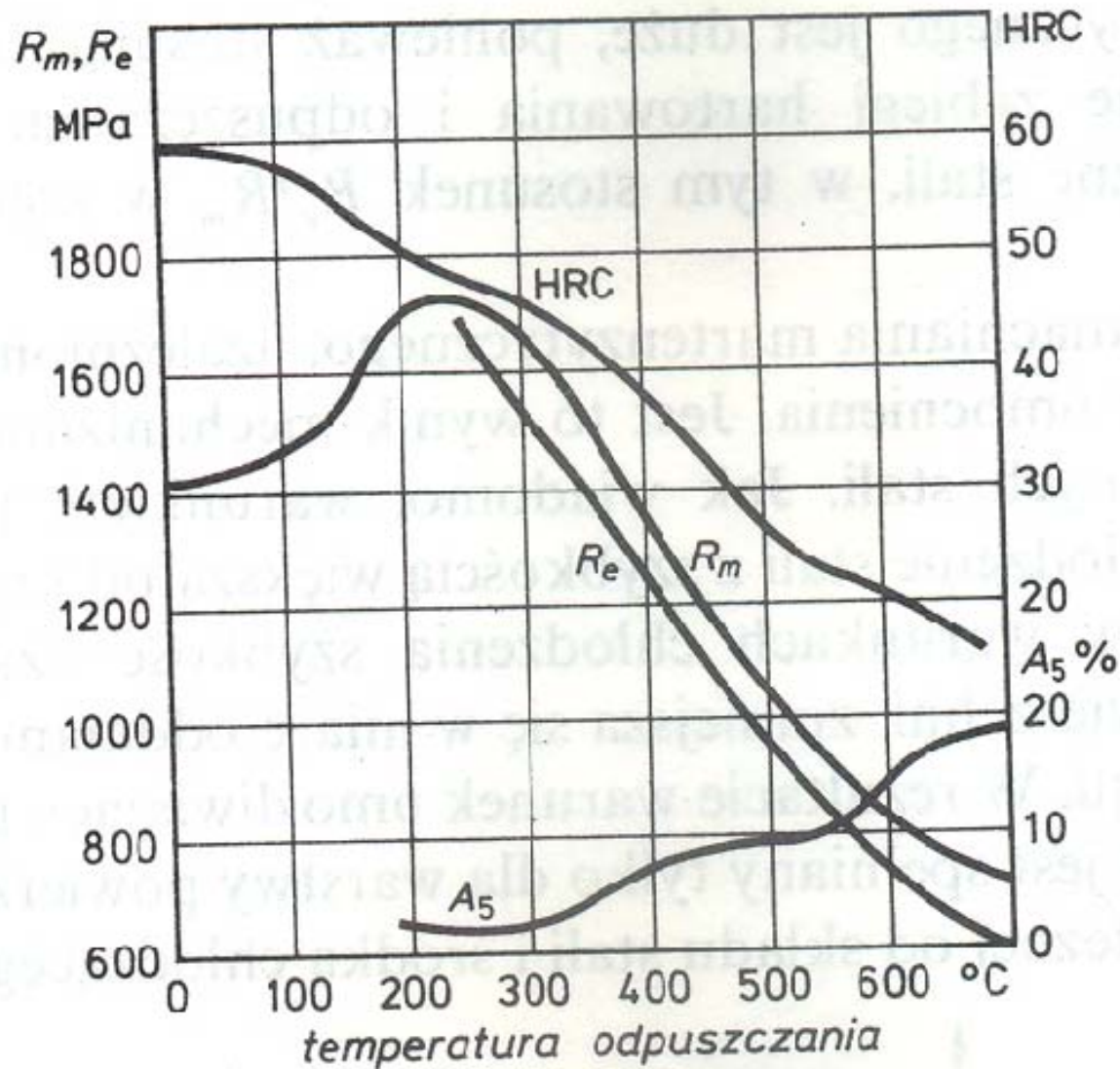
Zależność zawartości węgla w martenzycie od temperatury odpuszczania

2. 200-300°C: dalszy ciąg wydzielania węgla ε i zanik tetragonalności martenzytu, zmniejszenie naprężeń własnych sieci martenzytu i naprężeń ściskających austenitu szczątkowego. Dzięki temu jest możliwe wznowienie przemiany austenitu szczątkowego w martenzyt/bainit dolny.

3. 300-400°C: ostateczny zanik przesycenia martenzytu, znacząca dyfuzja węgla umożliwia zarodkowanie i wzrost stabilnego węgla Fe_3C – cementytu. Tworzy się mieszanina ferrytu i cementytu.

4. 400°C- A_{C1} : rozrost i sferoidyzacja wydzielení cementytu.

Pierwiastki stopowe Cr, W, Mo, V, Co, Si stabilizują martenzyt, co objawia się przesuwaniem poszczególnych stadiów przemian do wyższych temperatur.



Właściwości mechaniczne stali zawierającej około 0,45% C po odpuszczeniu w różnych temperaturach

ODPUSZCZANIE

Stal zahartowana na martenzyt, oprócz pożądanej dużej twardości i wytrzymałości, posiada niekorzystne cechy, tj. znaczną kruchość i naprężenia własne. Z tego powodu, po hartowaniu stosuje się zawsze odpuszczanie, tj. obróbkę cieplną polegającą na wygrzaniu zahartowanej stali w temperaturach niższych od A_{c1} i studzeniu, zwykle w powietrzu.

- Niskie (150-250°C), stosowane do narzędzi. Zmniejsza kruchość i poprawia ciągliwość stali i znacznie ogranicza naprężenia hartownicze.
- Średnie (250-500°C), stosowane do sprężyn i resorów. Silnie zmniejsza kruchość i naprężenia, zachowuje dużą wytrzymałość i twardość, nadając dobrą sprężystość i wytrzymałość zmęczeniową.
- Wysokie (500°C – A_{c1}), stosowane do stali konstrukcyjnych. Całkowicie usuwa naprężenia, powoduje spadek umocnienia i wzrost ciągliwości. Zapewnia optymalny zespół właściwości mechanicznych. Operacja hartowania i wysokiego odpuszczania nosi nazwę ulepszania cieplnego.

OBRÓBKA CIEPLNO-CHEMICZNA

Obróbka cieplno-chemiczna jest zabiegiem cieplnym lub zespołem takich zabiegów dla uzyskania zmiany składu chemicznego w warstwie wierzchniej obrabianego elementu i uzyskanie w tej strefie właściwości odmiennych niż w rdzeniu, np. zwiększonej odporności na ścieranie, zmęczenie, korozyjne działanie środowiska

Obróbka polega na nasyceniu warstwy wybranymi pierwiastkami z wykorzystaniem dyfuzji atomów aktywowanych ciepłem. O wynikach obróbki decydują: temperatura, czas i różnica stężeń pierwiastka w podłożu i ośrodku nasycającym.

Najczęściej stosowane zabiegi obróbki cieplno-chemicznej: **nawęglanie, azotowanie**, węgloazotowanie i azotonawęglanie, krzemowanie, metalizowanie dyfuzyjne (aluminiowanie, chromowanie, cynkowanie itp.)

Nawęglanie jest obróbką cieplno-chemiczną polegającą na dyfuzyjnym nasyceniu warstwy wierzchniej stali węglem podczas wygrzewania obrabianego przedmiotu w ciągu określonego czasu w ośrodku, w którym powstaje węgiel atomowy.

Cel nawęglania: podwyższenie twardości i odporności na ścieranie powierzchni stalowego elementu przy zachowaniu dobrej ciągliwości (udarności) rdzenia elementu.

Ośrodki nawęglające, m.in.: stałe (węgiel drzewny), roztopione sole (węglany, chlorki metali alkalicznych), gazowe (CO, CH₄)

Temperatura nawęglania: 900-950°C (Zakres austenitu, gdyż węgiel rozpuszcza się w austenicie do ~ 2%. Rozpuszczalność węgla w ferrycie ~0%)

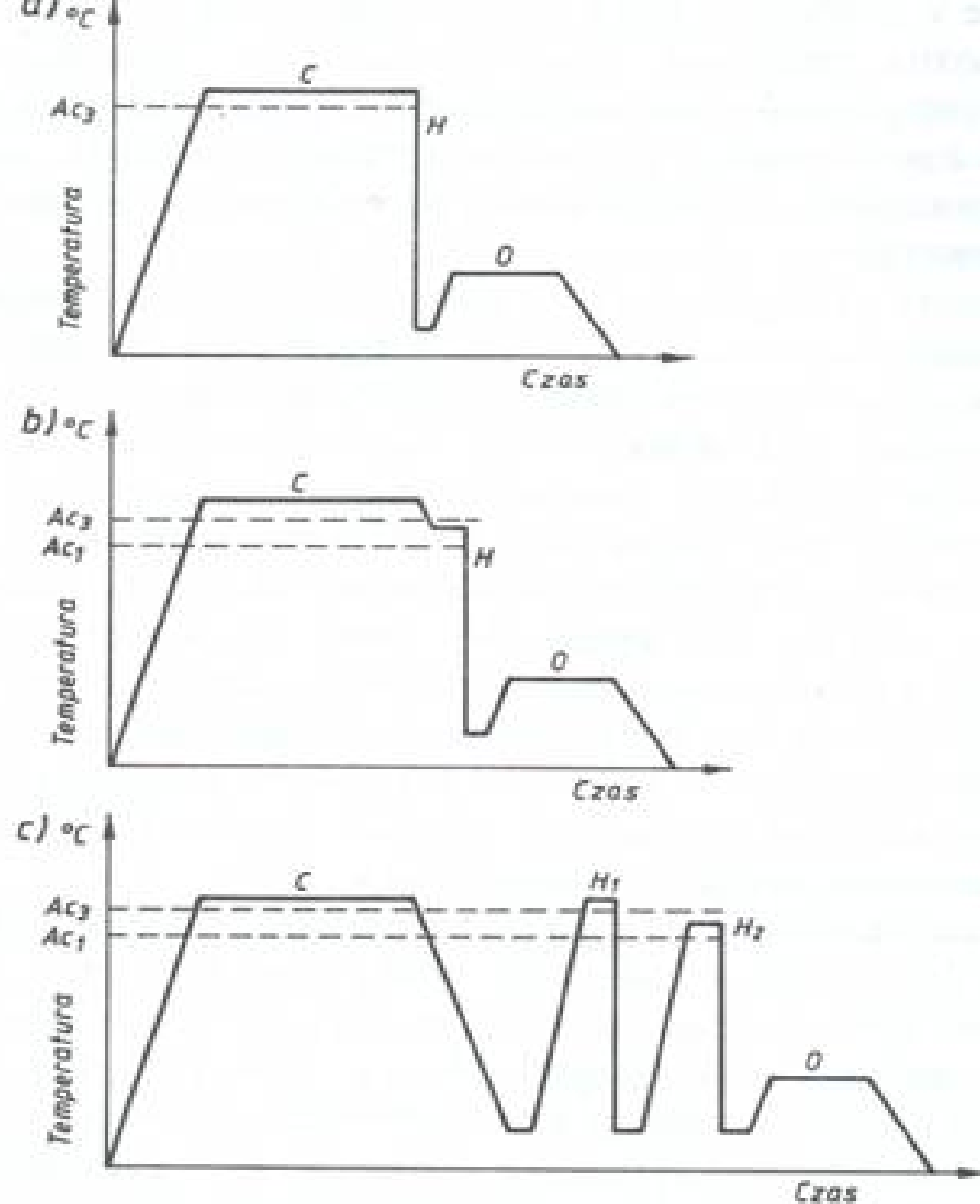
Stale do nawęglania – do ok. 0,25%C, węglowe i niskostopowe z chromem, niklem, molibdenem – pierwiastkami poprawiającymi hartowność stali

Zawartość węgla w stali po nawęglaniu: ~0,8 % w strefie przypowierzchniowej, malejąca w kierunku rdzenia

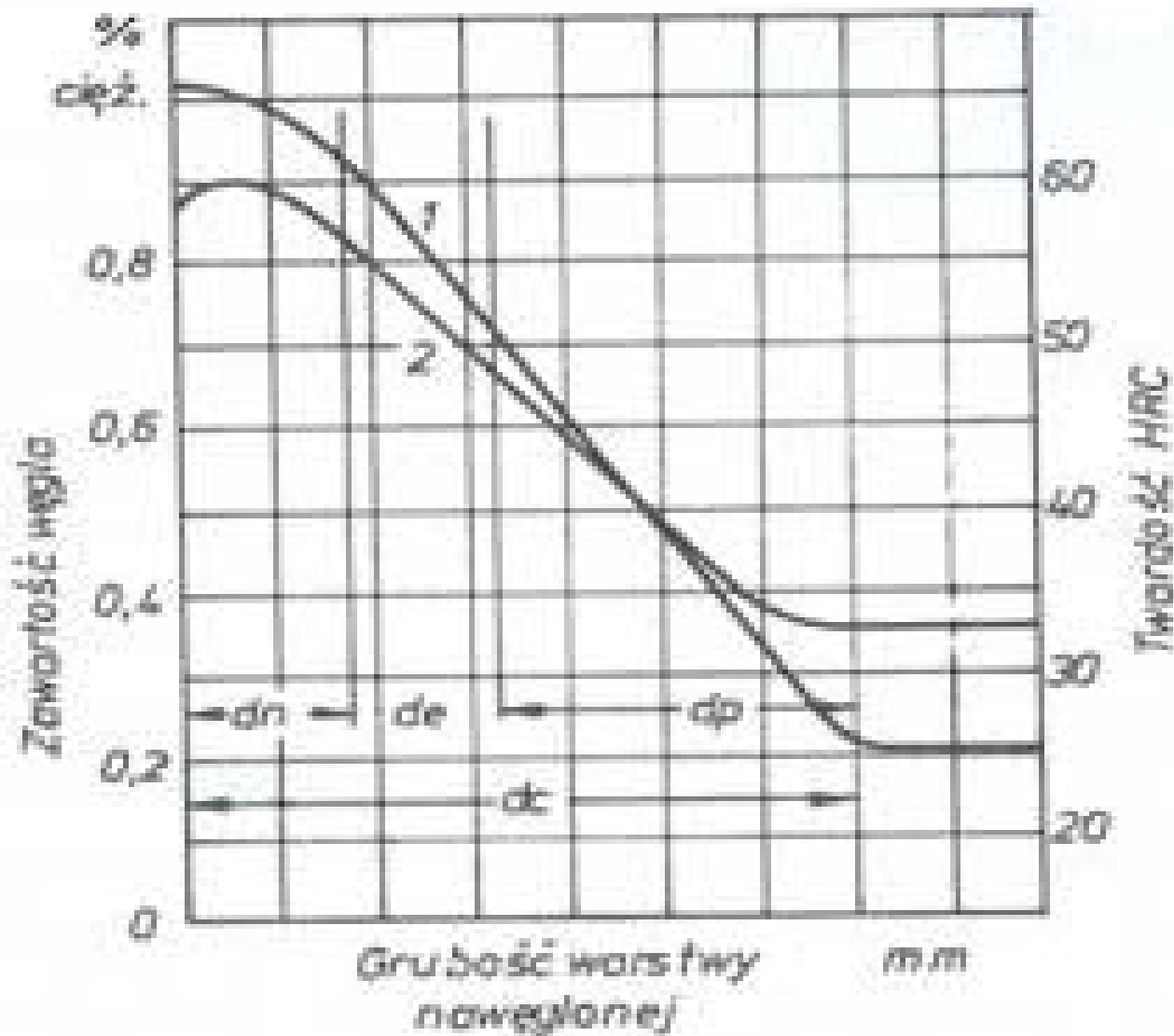
Grubość nawęglonej warstwy: ~ 1 mm

Struktura i twardość stali po nawęglaniu: perlit (sam lub z małym udziałem Fe_3C) o twardości 250-300 HB na powierzchni, do ferrytyczno-perlitycznej o twardości 100-150 HB w rdzeniu. Twardość powierzchni bezpośrednio po nawęglaniu jest zbyt niska, aby poprawić odporność na ścieranie. Z tego powodu po nawęglaniu stosuje się zawsze hartowanie i odpuszczanie niskie.

Struktura i twardość powierzchni stali po hartowaniu i odpuszczaniu: martenzyt (sam lub z małym udziałem Fe_3C) o twardości ~ 60 HRC.



Rys. 11.4. Przykłady sposobów obróbki cieplnej po nawęglaniu: a) hartowanie bezpośrednie z temperatury nawęglania, b) hartowanie z podchłodzeniem, c) hartowanie podwójne; C – nawęglanie, H – hartowanie, O – odpuszczanie



Rozmieszczenie węgla po nawęglaniu (1) i twardości po nawęglaniu i hartowaniu (2), d_c – całkowita głębokość nawęglania, d_n – perlit+cementyt po nawęglaniu (strefa nadeutektoidalna), d_e – perlit po nawęglaniu (strefa eutektoidalna), d_p – ferryt+perlit po nawęglaniu (strefa podeutektoidalna)

Typowe części dla których stosuje się nawęglanie:

- koła zębate silnie obciążone i poddawane zmiennym obciążeniom
- wałki uzębione i z wieloklinami
- wałki rozrzędu i krzywki sterujące
- sworznie tłokowe
- gryzy narzędzi do wierceń geologicznych i górniczych
- pierścienie i wałki łożysk wielogabarytowych

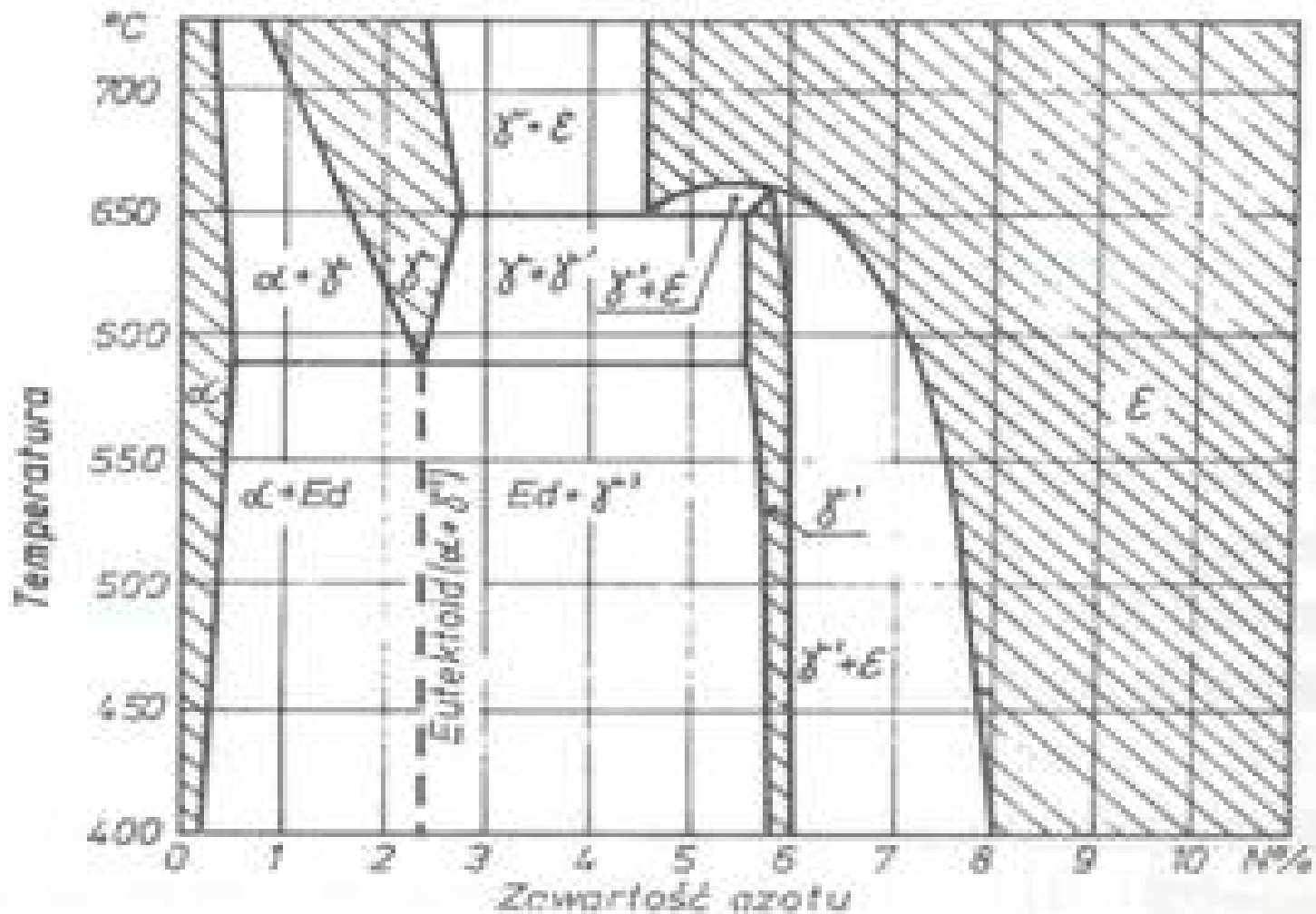
Azotowanie polega na dyfuzyjnym nasycaniu azotem warstwy wierzchniej stalowych elementów podczas wygrzewania w ciągu określonego czasu w ośrodku zawierającym azot atomowy w temperaturze niższej niż A_{c1} .

Cel azotowania: podwyższenie odporności na ścieranie, wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na korozję

Obróbka cieplna przed azotowaniem: ulepszanie cieplne (hartowanie + odpuszczanie wysokie) w celu uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych w rdzeniu elementu.

Ośrodki: najczęściej strumień zdysocjowanego amoniaku w temperaturze 500-800°C, $\text{NH}_3 \leftrightarrow 3\text{H} + \text{N}$

Grubość warstwy: 0,005 – 0,5 mm



Rys. 11.6. Dwuskładnikowy wykres równowagi Fe–N

α - nitroferryt, roztwór azotu w Fe α , γ – nitroaustenit, roztwór azotu w Fe γ
 ϵ - azotek Fe_2N , γ' – azotek Fe_4N

Rodzaje azotowania:

1. Utwardzające

- Temperatura ~ 500°C
- Stale średniowęglowe, ok. 0,4%C, w tym z pierwiastkami stopowymi Cr, Mo, Al, tworzącymi twarde azotki
- Struktura i twardość wierzchniej warstwy stali po azotowaniu: azotki o dużym stopniu dyspersji, twardość 1000-1500 HV

2. Antykorozyjne

- Temperatura ~600-700 °C
- Zwykle stale węglowe
- Struktura i twardość wierzchniej warstwy stali po azotowaniu: azotek ϵ o twardości od ~ 500 HV

Zastosowanie azotowania: elementy konstrukcyjne i narzędziowe narażone podczas pracy na zużycie ścierne i korozję, np. elementy silników i pomp w przemyśle okrętowym, lotniczym i motoryzacyjnym, narzędzia do obróbki plastycznej i skrawania, elementy wyłaczarek i wtryskarek