

POLITECHNIKA LUBELSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY  
KATEDRA INŻYNIERII  
MATERIAŁOWEJ

Laboratorium  
Inżynierii  
Materiałowej

## 15. BADANIE HARTOWNOŚCI STALI

### 15.1. Hartowność stali

Współczesny przemysł stwarza konieczność szerszego stosowania stali ulepszonych cieplnie. Wymaga to coraz częściej możliwości świadomego sterowania procesem wytwórczym tak, aby uzyskać określoną strukturę i własności.

Pojęcie hartowności na przestrzeni lat przeszło określoną ewolucję. W minionym okresie z pojęciem hartowności łączono szereg odrębnych cech metali i stopów takich jak: głębokość hartowania, maksymalna twardość na powierzchni, wielkość ziarna w warstwie zahartowanej i skłonność do tworzenia odkształceń, rys i pęknięć.

Aktualnie przez pojęcie hartowność stali rozumie się zdolność materiału do tworzenia struktury martenzytycznej przy oziębianiu od temperatury austenitizowania. Wyniki hartowności określa się liczbowo lub graficznie.

Celem ujednoczenia przebiegu badań hartowności oraz umożliwienia dokonywania porównań wprowadzono pojęcie pomocnicze takie jak: średnica krytyczna, idealna średnica krytyczna i przekrój miarodajny.

Średnica krytyczna stanowi największą średnicę pręta hartującego się na wskroś w procesie hartowania. Jako kryterium odniesienia przyjęto strukturę składającą się z 50% martenzytu i 50% struktur niemartenzytycznych. Stosowanie tego kryterium jest korzystne z punktu widzenia praktycznego ponieważ może być określona struktura w stalach stopowych przy pomocy obserwacji mikroskopowych trawionych przekrojów poprzecznych albo przy pomocy badania twardości w różnych odległościach od powierzchni.

Idealna średnica krytyczna stanowi największą średnicę przekroju hartującego się na wskroś w idealnej kąpeli hartowniczej to znaczy takiej, która miałaby zdolność przejmowania ciepła z nieskończenie dużą szybkością. Wprawdzie pojęcie idealnej średnicy krytycznej ma charakter teoretyczny, to jest często używane w nomogramach w zestawieniu ze średnicą krytyczną.

Przekrój miarodajny, stanowi największy przekrój danego elementu, gdzie w myśl założeń konstrukcyjnych własności winny być jednakowe lub winny mieścić się w określonych granicach tolerancji.

## 15.2. Czynniki wpływające na hartowność

Hartowność stali należy do podstawowych właściwości, które decydują o zastosowaniu. Hartowność zależy od kilku czynników. Do podstawowych czynników decydujących o hartowności należy zawartość węgla i pierwiastków stopowych. Zwiększenie zawartości węgla podwyższa hartowność stali. Wzrost zawartości pierwiastków stopowych najczęściej stosowanych również podwyższa hartowność. Dużą rolę odgrywa skład austenitu przed procesem chłodzenia. Nagrzewanie tej samej stali do zakresu wyższych temperatur austenitowania powoduje zwiększenie hartowności.

Dla stali węglowej krytyczna szybkość hartowania zmniejsza się ze zwiększeniem zawartości węgla. Podwyższenie zawartości węgla od 0,4% C do 0,8% C powoduje obniżenie szybkości krytycznej od ok. 520° C/s do ok. 160° C/s. Wpływ pierwiastków stopowych na krytyczną szybkość hartowania przedstawiono na rysunku 15.1.

Wpływ pierwiastków stopowych w stalach niskostopowych na współczynnik hartowności przedstawiono graficznie na rys. 15.2. Według danych opracowanych przez Grossmanna na podstawie zawartości pierwiastków stopowych w najczęściej stosowanych stalach konstrukcyjnych, można obliczyć idealną średnicę krytyczną stali w której występuje kilka pierwiastków stopowych.

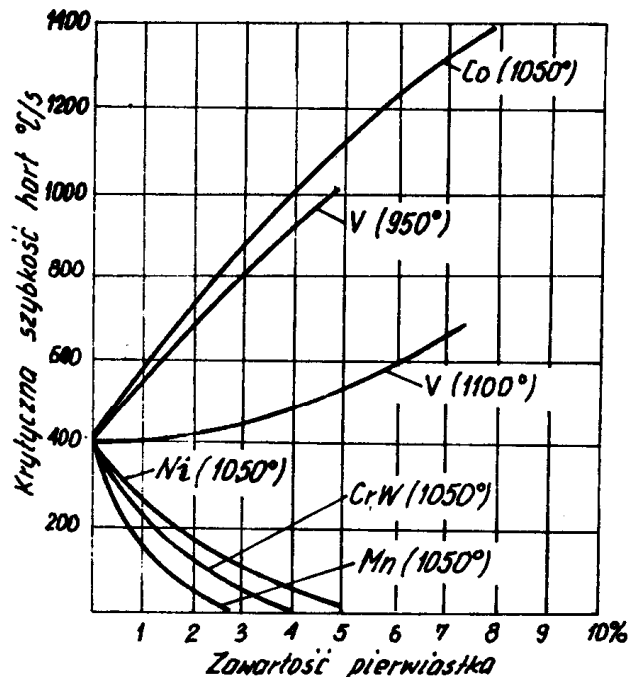
$$D_i = D_{iw} K_1 K_2 K_3 K_4$$

gdzie:

$D_i$  – idealna średnica krytyczna stali stopowej

$D_{iw}$  – idealna średnica krytyczna stali węglowej przy określonej zawartości węgla

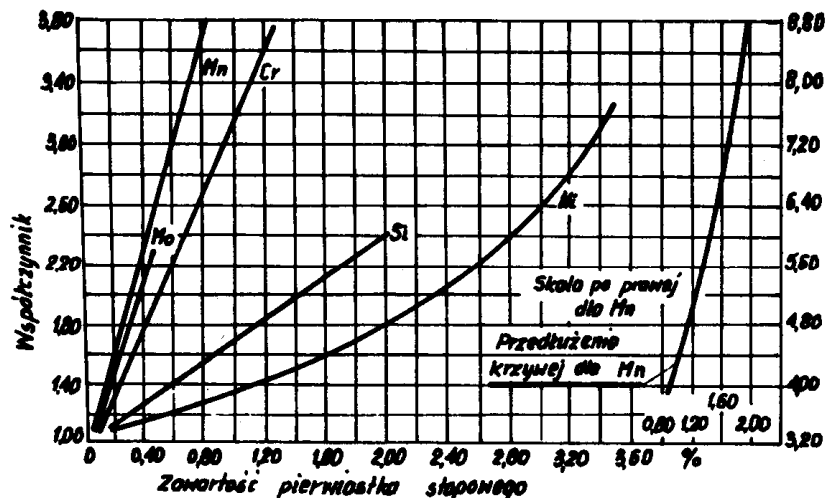
$K_1, K_2, K_3, K_4$  – współczynniki dla odpowiedniego pierwiastka stopowego



Rys. 15.1. Wpływ pierwiastków stopowych na krytyczną szybkość hartowania

Dla pierwiastków nie tworzących węglików oraz manganu współczynniki hartowności określają ich wpływ stosunkowo dokładnie. Natomiast pierwiastki tworzące stabilne węgliki mogą wykazywać odchylenia spowodowane niepełnym rozpuszczaniem węglików podczas austenitowania.

Na obniżenie hartowności wpływa siarka. Siarka przy najczęściej stosowanych



Rys. 15.2. Współczynniki do obliczenia hartowności dla głównych składników stopowych

temperaturach hartowania nie jest rozpuszczona w austenicie i znajduje się we wtrąceniach, które są siarczkami głównie manganu. Stąd widać, że część zawartości manganu nie jest rozpuszczona w austenicie. Stale odtlenione aluminium są drobnoziarniste co zmniejsza hartowność. Węglik molibdenu w stalach niskostopowych rozpuszczają się łatwo podczas austenitzowania przy założeniu, że zawartość molibdenu jest mała i nie przekracza 0,25%. Jednakże, gdy stal oprócz molibdenu zawiera chrom to występuje utrudnione rozpuszczenie węglików podczas austenitzowania. Dodatek do stali boru już w zakresie tysięcznych części procenta bardzo znacznie poprawia hartowność. Najskuteczniej na hartowność wpływają dodatki w zakresie 0,002–0,005% B. Trzeba jednak pamiętać, że bor łatwo łączy się z azotem oraz tlenem i dlatego przed wprowadzeniem boru w procesie metalurgicznym stal winna być skutecznie odtleniona a azot winien być związany dodatkiem tytanu lub cyrkonu. Podwyższenie temperatury i czasu austenitzowania powoduje rozpuszczenie większej ilości węgla i składników stopowych w austenicie a także wzrost wielkości ziarna austenitu i jego jednorodności co w konsekwencji powiększa hartowność. Trzeba mieć na uwadze, że powiększenie parametrów austenitzowania powoduje wzrost naprężeń hartowniczych co może być przyczyną odkształceń oraz pęknięć hartowniczych.

Stale skłonne do powiększania wymiarów ziarna powyżej temperatury  $A_{c3}$  posiadają większą hartowność w porównaniu do stali drobnoziarnistych. Na hartowność wpływają również wymiary węglików, ich kształt oraz stopień dyspersji. Węglik o dużych wymiarach zwłaszcza w kształcie sferoidalnym znacznie wolniej rozpuszczają się w austenicie co powoduje, że hartowność takich stali będzie mniejsza w porównaniu do tych stali, gdzie występują w postaci płytkowej lub igiełkowej.

### 15.3. Metody określania hartowności stali

**M e t o d a J o m i n y e g o.** Spośród różnych metod badania hartowności najszersze zastosowanie znalazła metoda Jominy ego. W warunkach przemysłowych naszego kraju próba hartowania od czoła według tej metody jest określana Polską Normą PN-79/H-04402. Norma jest stosowana do prób hartowności stali w zakresie badań odbiorczych, kontrolnych i rozjemczych. Nie zaleca się tej metody dla badania stali o małej i o dużej hartowności.

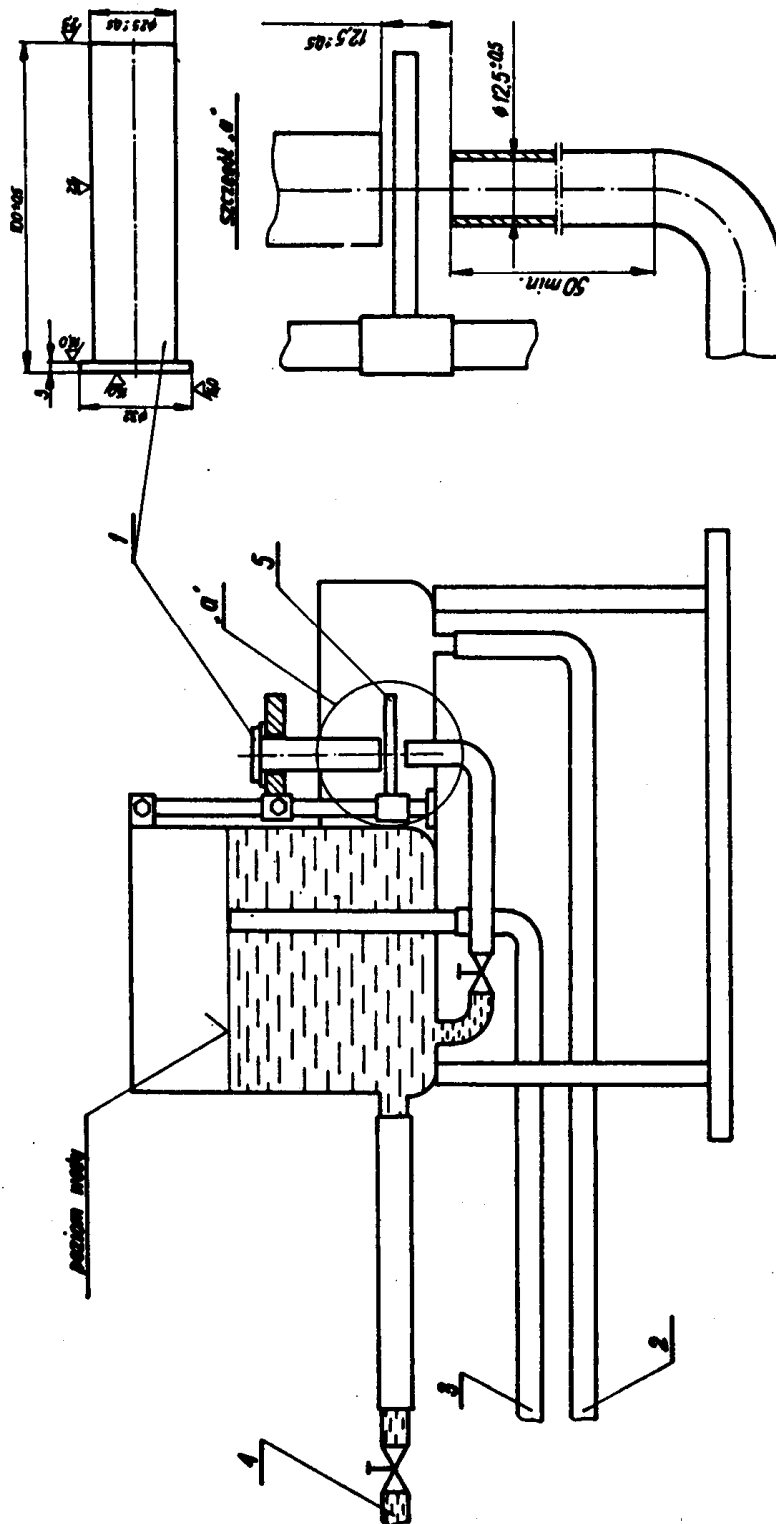
Próbka do badań ma kształt cylindryczny z małym kołnierzem do mocowania. Wymiary próbki wynoszą: średnica  $\phi = 25 \pm 0,5$  mm i długość  $l = 100 \pm 0,5$  mm. Urządzenie do hartowania winno zapewniać współosiowe ustawienie próbki do dyszy natryskowej oraz zapewnić stałą odległość od czoła próbki do wylotu dyszy, wynoszącą  $12,5 \pm 0,5$  mm. Przed umieszczeniem próbki w uchwycie urządzenia hartowniczego należy uregulować dopływ wody tak, aby wysokość strumienia wynosiła  $65 \pm 10$  mm.

Próbkę do badania hartowności nagrzewa się w piecu w atmosferze ochronnej albo w osłonie zabezpieczającej przed odwęgleniem lub utlenieniem. Temperatura nagrzewania wynosi  $A_{c_3} + (30 \div 50)^{\circ} C$ , czas wygrzewania  $30 \pm 5$  min. Po wygrzaniu próbkę wyjmuje się z pieca i szybko umieszcza w uchwycie przyrządu hartowniczego. Schemat urządzenia do hartowania od czoła pokazano na rysunku 15.3. Na wygrzaną próbkę umieszczoną w urządzeniu hartowniczym kieruje się natrysk wody przez odsunięcie przestony dyszy (czas chłodzenia 10 minut). Zahartowaną i ochłodzoną do temperatury otoczenia próbkę należy przeszlifować z dwu stron na głębokość od 0,4 do 0,5 mm. Przez krótkotrwałe zanurzenie (2–3 s), w roztworze wodnym kwasu solnego sprawdzić można jakość szlifowanej powierzchni, na której nie powinny występować ciemne plamy. Na powierzchniach szlifowanych wykonuje się pomiar twardości w odległości co 1,5 mm dla dwóch pierwszych pomiarów oraz co 2 mm dla kolejnych 6 pomiarów i dalej co 5 mm.

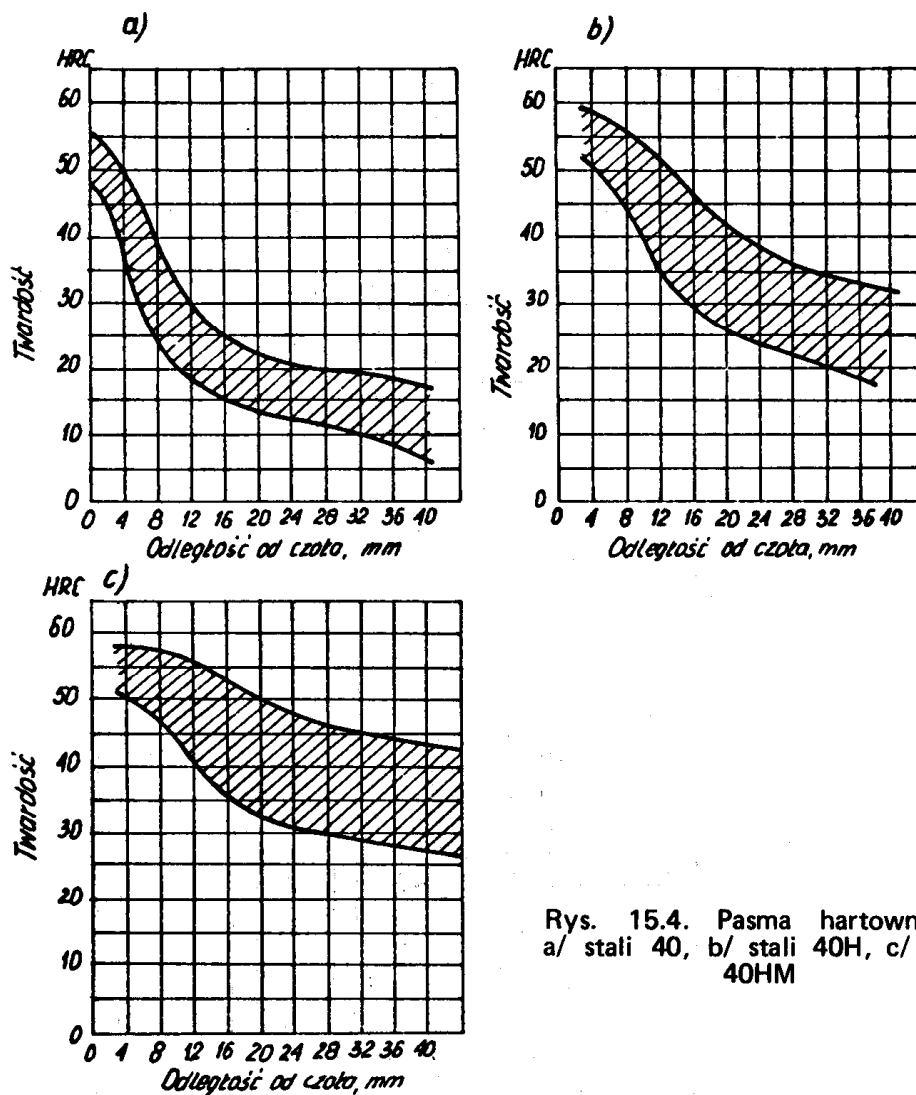
Otrzymane wyniki pomiarów twardości (średnie arytmetyczne) nanosi się na wykres zależności: twardość, odległość od czoła. Łącząc poszczególne punkty wyznacza się krzywą stanowiącą charakterystykę hartowności stali.

Wyniki badań różnych próbek z tego samego wytopu wskazują pewne różnice w przebiegu hartowności na które mają wpływ: segregacja składu chemicznego, wielkość ziarna, miejsce pobrania próbek a także zmiany w przebiegu samej próby. Celem określenia hartowności gatunku stali lub danego wytopu wykonuje się wówczas określoną partię badań i naniesione wyniki tworzą obszar powierzchni określany pasmem hartowności. W granicach pasma winna mieścić się w zasadzie każda próba hartowności danego gatunku. Przykłady pasm hartowności stali: 40, 40H i 40HM podano na rysunkach 15.4. a, b, c.

**M e t o d a P-F.** Do określenia hartowności tą metodą wykonuje się kilka próbek okrągłych z naciętym karbem i hartuje z różnych temperatur. Otrzymany przełom porównuje się z kompletem wzorców. Chłodzenie przeprowadza się w 10% roztworze



Rys. 15.3. Schemat urządzenia do hartowania od czoła: 1 – próbka, 2 – odpływ, 3 – przepływ – przelew, 4 – dopływ, 5 – przystosowana obrotowa



Rys. 15.4. Pasma hartowności:  
a/ stali 40, b/ stali 40H, c/ stali 40HM

wodnym chlorku sodu. Cechą ujemną tej metody jest konieczność wykonywania kilku próbek i ograniczone zastosowanie do stali narzędziowych węglowych.

**M e t o d a P–V.** Jest jedną z nowszych metod badania hartowności głównie wysoko węglowych stali narzędziowych. Próbką w tej metodzie posiada kształt pryzmatyczny o kącie dwusiecznym równym  $90^{\circ}$ . Długość próbki wynosi ok. 30 mm. Po wygrzaniu w temperaturze austenitowania, próbkę przenosi się do urządzenia, gdzie przeprowadza się oziębienie natryskiem dwu powierzchni przyległych do kąta prostego. Po zahartowaniu próbkę przecina się, szlifuje i trawi celem określenia głębokości zalegania struktury martenzytycznej oraz dokonuje się pomiaru twardości strefy zahartowanej. Hartowność określa się przez oznaczenie odległości od wierzchołka kąta prostego zalegania struktury zawierającej martenzyt w ilości co najmniej 50%.

**M e t o d a SAC.** Stosowana w niektórych krajach pod nazwą Rockvell-Inch. Głównie ma zastosowanie do stali płytko hartujących się oraz stali węglowych zawierających  $C = 0,3-0,6\%$ . Badaniu poddaje się próbki okrągłe  $\phi = 25,4$  mm, chłodzone w bieżącej wodzie. Zahartowane próbki przecina się, poleruje i trawi dla ujawnienia głębokości strefy zahartowanej. Wykonuje się pomiar twardości na powierzchni oraz serię pomiarów na przekroju pomiędzy powierzchnią a środkiem. Drugą serię pomiarów prowadzi się pod kątem  $90^{\circ}$  do pierwszej serii. Połowę wielkości twardości na powierzchni i w środku dodaje się do średnich wartości i sumę dzieli się przez osiem. Jest to średnia twardość struktury próbki o średnicy 25,4 mm.

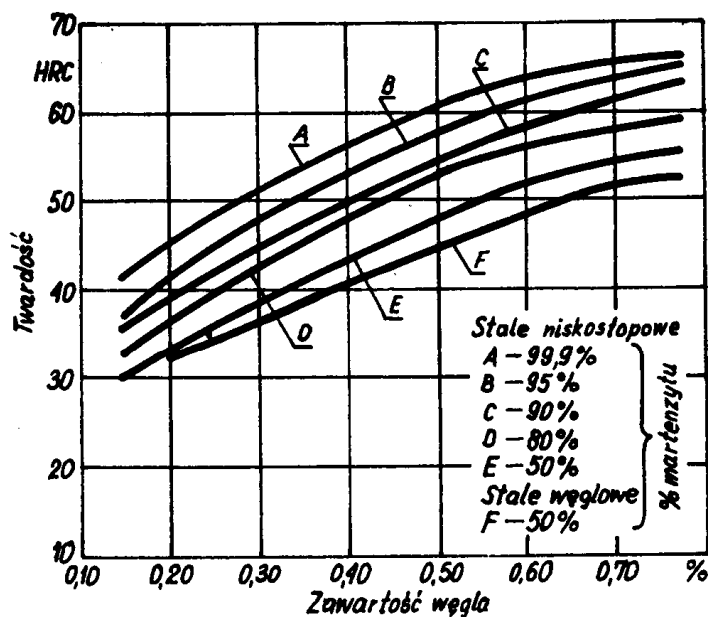
**M e t o d a S a c h i n a.** W tej metodzie hartowność ocenia się na podstawie przełomu próbek udarnościowych. Pakiet próbek do badania udarności łączy się obejmą i po wygrzaniu przy temperaturze austenitowania chłodzi w cieczy. Na podstawie przełomów próbek można określić głębokość zalegania struktury martenzytycznej. Łatwo zauważyć, że jest to metoda szacunkowa obarczona błędem z uwagi na różną szybkość chłodzenia próbek znajdujących się w narożach pakietu w stosunku do próbek umieszczonych w środku.

#### 15.4. Wykorzystanie krzywej hartowności do racjonalnego doboru stali na części maszyn

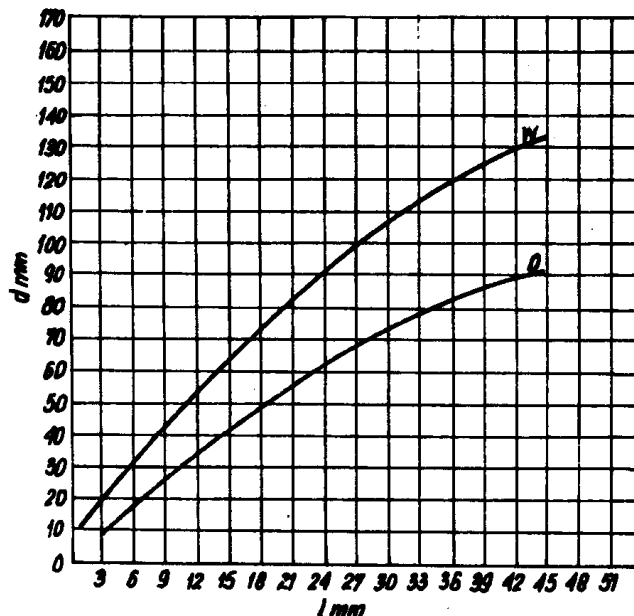
Dla konstruktorów maszyn i urządzeń oraz pracowników służby eksploatacyjnej w danych elementach przenoszących złożony stan naprężeń ważnym staje się jaki jest przekrój miarodajny, to znaczy największy przekrój kołowy, gdzie w myśl założeń oczekuje się stabilizacji struktury i własności. Zwykle określa się rodzaj struktury, jej twardość, wytrzymałość na rozciąganie oraz własności plastyczne. Inne są własności martenzytu odpuszczonego, bainitu górnego, bainitu dolnego, perlitu i ferrytu w stali węglowej, stali niskostopowej i średniostopowej. Coraz częściej poza badaniami konwencjonalnymi konstruktorzy i technolodzy określają inne dodatkowe próby, których głównym celem jest podanie informacji jak dane elementy będą zachowywać się w określonych złożonych warunkach? Do tych badań zalicza się takie próby jak: określenie wytrzymałości na zmęczenie przy określonym rodzaju obciążenia, próba pełzania oraz badanie odporności na zmęczenie cieplne.

W większości zastosowań inżynierskich ważna jest problematyka doboru takiej stali i ustalenia takich warunków obróbki cieplnej aby uzyskać określoną twardość struktury.

Próbę hartowania od czoła, można zastosować do przybliżonego określenia hartowności prętów okrągłych. Dla uzyskania danych w tym zakresie należy w pierwszej kolejności określić oczekiwaną twardość stali w zależności od zawartości węgla oraz udziału martenzytu na podstawie zależności graficznej (rys. 15.5.). W dalszej kolejności z krzywej hartowności dla danej stali dokonuje się odczytania odległości od czoła w jakiej ta twardość występuje. Po tym z następnego wykresu (rys. 15.6.) można określić średnicę krytyczną badanej stali przy hartowaniu w wodzie lub oleju. W dalszej kolejności



Rys. 15.5. Orientacyjna twardość stali zahartowanej w zależności od zawartości węgla oraz udziału martenzytu w strukturze



Rys. 15.6. Orientacyjna zależność między średnicą krytyczną stali chłodzonej w wodzie (krzywa "w") lub w oleju (krzywa "o") a odległością od czoła l, przy której uzyskano wymaganą twardość strefy zahartowanej

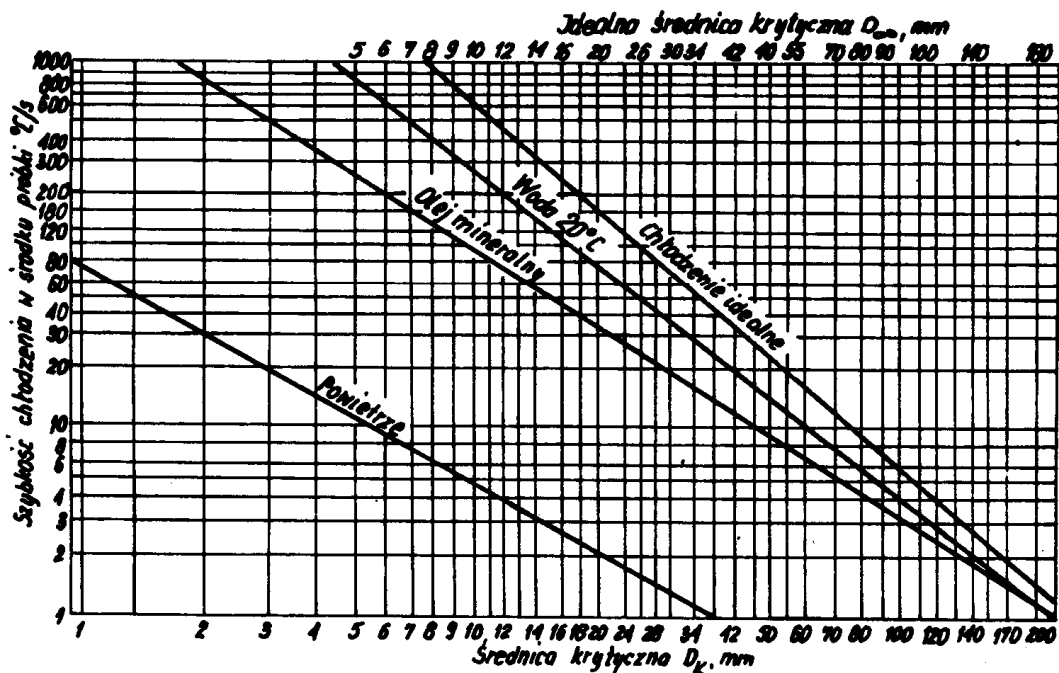
można określić rzeczywiste średnice krytyczne przy chłodzeniu w różnych ośrodkach oraz ustalić przybliżoną szybkość chłodzenia w środku badanych próbek (rys. 15.7.).

## 15.5. Przebieg ćwiczenia

### A. Cel ćwiczenia

Zapoznanie studenta z głównymi czynnikami wpływającymi na hartowność stali oraz wyrobienie ogólnych umiejętności w doborze stali hartowanej na elementy maszyn i oprzyrządowania na podstawie wyników próby hartowania od czoła.





Rys. 15.7. Nomogram do określania rzeczywistych średnic krytycznych oraz idealnej średnicy krytycznej

#### B. Materiały i urządzenia do badań

Przedmiotem badań są próbki stalowe o wymiarach  $\phi$  25 x 100 mm wykonane ze stali 35, 45, 55, 40H, 40HNM, 20H2M lub inne według wskazań prowadzącego. Próbki nagrzewane są do hartowania w specjalnej osłonie z wkładką grafitową. Chłodzenie wykonywane jest w przyrządzie do hartowania od czoła.

#### Przygotowanie próbek.

Próbki do badań wręcza prowadzący ćwiczenie. Student winien sprawdzić stan powierzchni i w przypadku stwierdzenia śladów korozji lub zanieczyszczeń należy je usunąć przy użyciu papieru ściernego. Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy sprawdzić umiejscowienie próbki w przyrządzie i współosiowość próbki z dyszą.

#### C. Przebieg badań

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student winien przygotować się do ćwiczenia przez zapoznanie z wprowadzeniem i dostępną literaturą. Po sprawdzeniu przez prowadzącego opanowania materiału teoretycznego oraz wymagań instrukcji bhp i dopuszczeniu do wykonania ćwiczeń, należy wykonać niżej podane czynności:

1. Sprawdzić stan powierzchni próbki.
2. sprawdzić wymiary próbki,
3. sprawdzić ustawienie i funkcjonowanie urządzenia hartowniczego,

4. sprawdzić i uregulować odległość czoła próbki od wylotu dyszy (12,5 mm),
5. po umieszczeniu próbki w uchwycie sprawdzić zachowanie współosiowości w stosunku do osi dyszy natryskowej,
6. włożyć próbkę do osłony i nagrzewać do zakresu optymalnych temperatur,
7. ustalić w przyrządzie optymalny przepływ wody,
8. zamknąć przesłoną przepływ wody,
9. po wygrzaniu w temperaturze austenitowania w czasie  $30 \pm 5$  min., wyjąć próbkę możliwie sprawnie przy zachowaniu środków ostrożności i umieścić w przyrządzie hartowniczym,
10. po ustaleniu położenia próbki w przyrządzie, odsunąć przesłonę celem rozpoczęcia hartowania,
11. chłodzić w czasie 10 min.,
12. ustawić próbkę w uchwycie pryzmowym,
13. dokonać pomiaru twardości wzdłuż tworzącej poczynając od czoła; pierwsze dwa pomiary wykonać w odległości 1,5 mm, następne 6 pomiarów w odległości co 2 mm i dalsze co 5 mm,
14. wyniki pomiarów zestawić w tablicy i obliczyć wartości średnie,
15. na podstawie wyników pomiarów twardości wykonać wykres zmiany twardości w funkcji odległości od czoła,
16. po wykonaniu wykresu przeprowadzić analizę wyników i wyznaczyć dla badanego materiału średnicę krytyczną  $D_k$ .

#### D. Opracowanie wyników i sprawozdania

Opracowane sprawozdanie z ćwiczenia winno zawierać następujące ważniejsze dane:

1. Temat i cel ćwiczenia.
2. Uzasadnienie doboru metody badawczej.
3. Przygotowanie próbek.
4. Szkice przyrządu hartowniczego.
5. Przebieg ćwiczenia.
6. Analizę wyników badań i wnioski.

#### Pytania kontrolne

1. Istota przemiany martenzytycznej.
2. Rodzaje hartowania stali.
3. Wpływ węgla na własności i hartowanie stali.
4. Wpływ dodatków stopowych na hartowność.
5. Metody badania hartowności stali.
6. Metoda Jominy'ego.
7. Wykorzystanie krzywej hartowności do racjonalnego doboru stali na elementy maszyn.
8. Pasma hartowności.

9. Średnica krytyczna, prędkość krytyczna i idealna średnica krytyczna.

#### Literatura

1. Crafts M., Lamont J. L. – Hartowność i dobór stali, PWT Warszawa 1958
2. Weroński A. – Teoretyczne podstawy hartowania natryskowego, Lublin 1979
3. Fiedorow W. J., Kabesko N. T. – Issledowanije ciepłowych prociesow pro zakałkie stali. Mietałowiedenie i Tiern. Obr. Mietałow 1970
4. Praca zbiorowa, autor działu T. Pełczyński – Obróbka cieplna stopów żelaza, WNT, Warszawa 1977
5. Biernsztajn M. Ł., Rachsztabta A. G. – Mietałowiedenie i Tiern. Obrabotka Stali, Moskwa 1961
6. Nekano T., Tekada B. i in. – Study on the Fog. Quenching Method, I. Iron and Steel Inst., t. 50, Japan 1963
7. Weroński A. – Z technologii hartowania płyt, Wiadomości Hutnicze, Nr 1, 1979
8. Weroński A. – Hartowanie natryskowe części płaskich. Przegląd Mechaniczny Nr 15, 1973
9. Wyatt O., Dew-Hughes D. – Wprowadzenie do inżynierii materiałowej, WNT Warszawa 1978
10. Nutting J. – Metaloznawstwo stali stopowych. Hutnik nr 12, 1969
11. Guy A. G. – Wprowadzenie do nauki o materiałach. PWN, Warszawa 1977