

OLEJE DO OBRÓBKI CIEPLNEJ METALI



18.1 Hartowanie

Hartowanie jest to proces stosowany w obróbce cieplnej metali, polegający na nagrzewaniu metalu i wytrzymaniu (wygrzaniu) w temperaturze wyższej od temperatury przemiany, a następnie oziębieniu. Celem hartowania jest poprawienie mechanicznych właściwości części (detali) wykonanych z metalu: zwiększenie twardości i wytrzymałości, poprawa sprężystości lub zmniejszenie naprężeń wewnętrznych. Proces hartowania najczęściej jest stosowany w przypadku stali. Prowadzi on do przemiany austenitu w martenzyt, nazywa się to wówczas hartowaniem martenzytycznym lub w bainit, jest to wtedy hartowanie bainityczne.

Na uproszczonym wykresie równowagi układu żelazo – węgiel (rys. 18.1), przedstawiono zakres temperatur hartowania stali. Wynika z niego, że rodzaj przemiany zależy od zawartości węgla w stali, ale także od szybkości z jaką będzie obniżać się temperatura hartowanej stali. W procesie hartowania istotną rolę odgrywa środek chłodzący, w którym następuje proces oziębiania i hartowania.

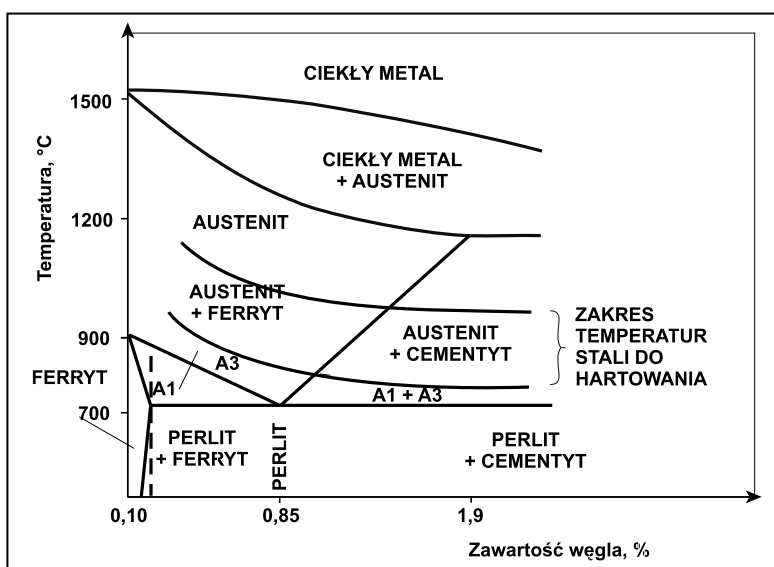
Proces hartowania polega na:

- nagrzaniu detalu do temperatury austenitacji (na rys. 18.1 jest to obszar zakreskowy),
- wygrzaniu, polegającym na wytrzymaniu detalu w określonej temperaturze, w celu uzyskania jednakowej temperatury w całej masie materiału,

- schłodzeniu z odpowiednią szybkością do temperatury otoczenia.

Wyróżnia się wiele odmian procesu hartowania:

- hartowanie zupełne – chłodzenie odbywa się od zakresu jednorodnego austenitu; na wykresie (rys. 18.1) obszar ten zakreskowano,
- hartowanie niezupełne – procesowi chłodzenia jest poddawana stal nagrzana do zakresu temperatury, w której występuje austenit i perlit,
- hartowanie zwykłe, z ciągłym oziębianiem w ośrodku chłodzącym, zapewniającym przemianę martenzytyczną lub bainityczną,
- hartowanie stopniowe, w którym chłodzenie zatrzymuje się, do wyrównania temperatury austenitu na przekroju hartowanego detalu, w celu zmniejszenia naprężeń wewnętrznych,
- hartowanie przerywane, polegające na kolejnym oziębianiu w dwóch różnych środkach chłodzących, np. najpierw w wodzie, a następnie w oleju,
- hartowanie z podchłodzeniem, w którym detal przed właściwym hartowaniem, jest wcześniej schładzany,
- hartowanie z przemianą izotermiczną, z zastosowaniem ośrodka izotermicznego, w celu przemiany austenitu w strukturę drobnego perlitu lub bainitu,
- hartowanie objętościowe, gdy hartowaniu podlega cała objętość hartowanego detalu.



Rys. 18.1 Uproszczony wykres równowagi żelazo – węgiel, na którym zakreskowano zakres temperatur hartowania zupełnego stali

W praktyce, największe znaczenie ma hartowanie stali, ale hartowaniu są poddawane również inne metale, np.: brązy aluminiowe i inne stopy miedzi oraz aluminium. Hartowaniu poddawane jest również szkło i niektóre inne materiały.

Stale zwane podeutoktoidalnymi, zawierające mniej niż 0,8% węgla, których struktura ma postać mieszaniny ziaren ferrytu (prawie czyste żelazo) i ziaren perlitu (składającego się z płytek cementytu w masie ferrytu) nagrzewa się do temperatury nieco wyższej (30...50°C), od temperatury oznaczonej linią A3 (rys. 18.1). Po wygrzaniu stal będzie zawierała tylko kryształy ferrytu z niewielką domieszką ziaren perlitu.

Stale eutoktoidalne, zawierające w stanie wyżarzonym około 0,85% węgla, zawierają tylko ziarna perlitu. Są one nagrzewane do temperatury nieco wyższej (30...50°C) od temperatury oznaczonej linią (A1 – A3), tzn. temperatury przemiany perlitu w austenit (około 725°C), a następnie chłodzone z programowaną szybkością tak, aby uzyskać wymagane parametry jakościowe stali.

Austenit – roztwór stały węgla w żelazie, o sieci regularnej, sześcienniej i centrowanych ścianach, występuje jako odrębna faza w układzie Fe-Fe₃C. Atomy węgla zajmują położenie w lukach oktaedetrycznych, tworząc roztwór stały, międzywęzłowy. W austenicie gęstość ułożenia atomów jest większa niż w ferrycie, stąd podczas przemiany austenitu w ferryt zachodzi zwiększenie objętości właściwej.

Bainit – produkt przemiany bainitycznej, powstający w wyniku tworzenia się igieł ferrytu przesyconego węglem, przy czym nadmiar węgla zostaje usunięty z roztworu w wyniku powstawania wydzielin cementytu wewnątrz igieł ferrytu. Wyróżnia się **bainit dolny** – występujący w dolnym zakresie temperatury przemiany oraz **bainit górny** – występujący w górnym zakresie temperatury przemiany.

Cementyt (cementyt pierwotny, pierwszorzędowy) – węgiel żelaza wydzielający się z fazy ciekłej podczas krzepnięcia w układzie Fe-Fe₃C. Występuje w stopach o zawartości węgla w granicach 4,3...6,67%. Wyróżnia się **cementyt wtórny** wydzielający się z austenitu i **cementyt trzeciorzędowy** wydzielający się z ferrytu.

Ferryt – roztwór stały węgla w żelazie, o sieci regularnej sześcienniej, przestrzennie centrowanej, występuje jako odrębna faza w czystych stopach Fe-Fe₃C. Ze względu na odkształcenie sieci spowodowane obecnością atomów węgla, jego rozpuszczalność w żelazie jest mała.

Martenzyt – przesycony roztwór stały węgla w żelazie o sieci tetragonalnej, powstający jako wynik bezdyfuzyjnej przemiany austenitu, w przemianie martenzytycznej.

Perlit – składnik struktury w układzie Fe-Fe₃C, stanowiący eutektoidalną mieszaninę **ferrytu i cementytu** o budowie płytkowej i zawartości 0,77% C (warunki równowagi). Perlit istnieje w temperaturze poniżej 727°C, w stopach o zawartości węgla w granicach 0,022...4,3%. W zależności od grubości płytek cementytu wyróżnia się: **perlit grubo**, **perlit drobny** (zwany **sorbitem hartowania**) oraz **perlit bardzo drobny** zwany **troostytem**.

Stale nadeutektoidalne, zawierające perlit i cementyt, są nagrzewane do tej samej temperatury co stale eutektoidalne. W tym przypadku cementyt (będący bardzo twardym składnikiem stali) pozostaje nie rozpuszczony w austenicie. W zahartowanej stali występuje on w postaci drobnych ziaren.

Nagrzewanie hartowanych części do wyższej temperatury niż wynika to z wykresu (rys. 18.1) nie przyczynia się do zwiększenia twardości. Natomiast wydłużenie czasu nagrzewania powoduje rozrost kryształów, a w jego wyniku zwiększenie kruchości metalu.

Stal nagrzana do temperatury powyżej linii A1 oraz A3, wolno stygnąc wraca do swej pierwotnej struktury typu perlitycznego. Natomiast, jeżeli będzie ona chłodzona z szybkością większą od tzw. krytycznej szybkości chłodzenia, następuje tzw. przemiana martenzytyczna; węgiel nie zdąży wykrystalizować z austenitu w postaci cementytu zawartego w perlicie lub w przypadku stali nadeutektoidalnych, w postaci tzw. cementytu wolnego; austenit przechodzi w martenzyt, materiał o dużej twardości, ale i dużej kruchości.

W przypadku wolniejszego chłodzenia, węgiel częściowo wydziela się w postaci bardzo drobnych płytek cementytu, tworząc struktury pośrednie: troostyt i sorbit. Mają one mniejszą twardość od martenzytu.

Zbyt szybkie chłodzenie powoduje powstawanie naprężeń hartowniczych, stąd szybkość chłodzenia powinna być zoptymalizowana: nie za duża ani nie za mała.

W rezultacie hartowania stal uzyskuje strukturę martenzytyczną lub bainityczną, która w stosunku do struktury wyjściowej charakteryzuje się:

- zwiększoną twardością,
- większą wytrzymałością na rozciąganie i większą granicą zmęczenia materiału,
- zmniejszoną udarnością,
- mniejszym wydłużeniem pod wpływem sił rozciągających.

W przypadku konieczności poprawy ciągliwości metalu, jest stosowany proces polegający na wygrzewaniu w temperaturze niższej niż temperatura austenitacji. Proces ten jest nazywany odpuszczaniem.

W zależności od sposobu nagrzewania metalu wyróżnia się:

- hartowanie z nagrzewaniem w całej masie metalu (hartowanie na wskroś),
- hartowanie powierzchniowe: płomieniowe (palnikiem gazowym), indukcyjne (prądami wirowymi), kąpielowe (zanurzenie w rozgrzanej kąpeli olejowej lub solnej).

Podstawowe znaczenie w procesie hartowania ma medium (środek chłodzący), w którym stal jest hartowana. Jako środki chłodzące najczęściej są stosowane (według malejącej intensywności chłodzenia): woda i roztwory wodne, oleje hartownicze, stopione sole lub metale, powietrze, ciekłe gazy.

Istotnym parametrem hartowania jest temperatura θ (teta) środka chłodzącego. Temperatura θ jest to temperatura, powyżej której występuje tzw. faza niestabilna, mogąca podczas chłodzenia z odpowiednią szybkością przemienić się w fazę metastabilną.

Faza niestabilna jest to taki stan hartowanego materiału, w którym proces hartowania może jeszcze pójść w różnych kierunkach: częściowo do martenzytu lub cementytu, w zależności od prędkości chłodzenia. W następującej po niej fazie metastabilnej miejscowo mogą powstawać struktury o zwiększonej kruchości.

W zależności od temperatury hartowania θ wyróżnia się:

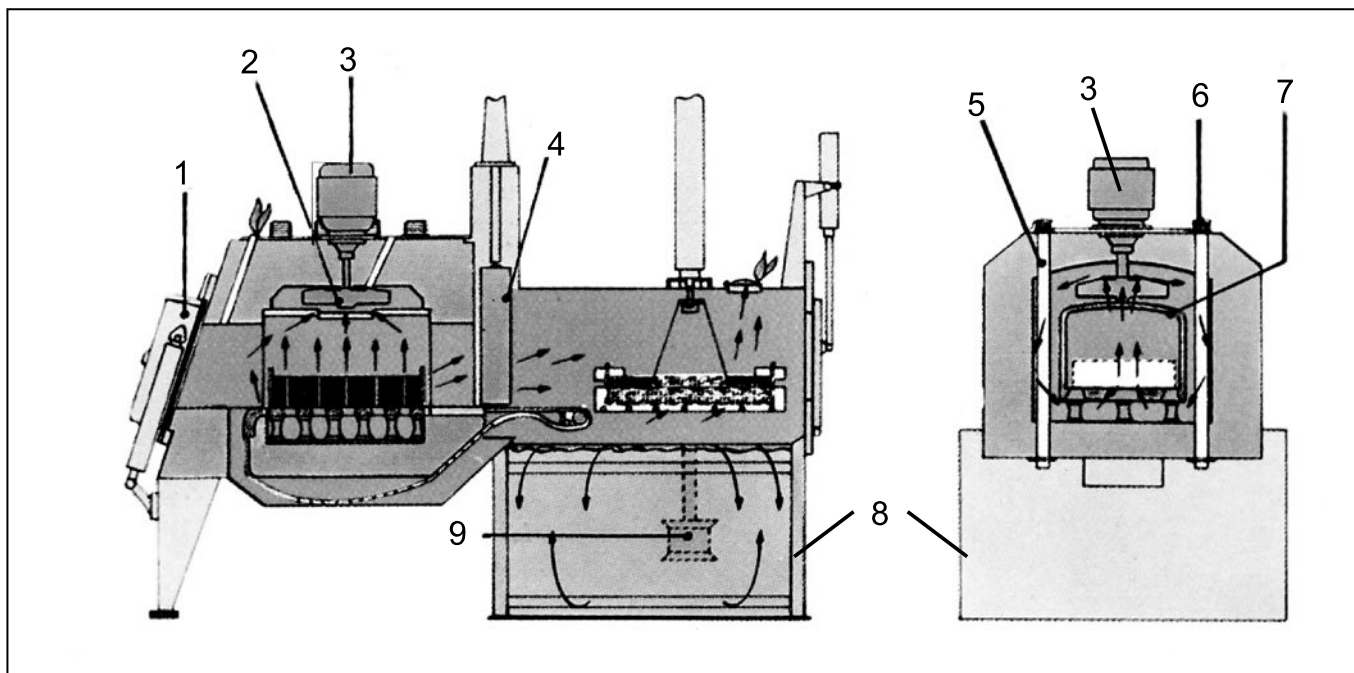
- hartowanie zimne ($\theta \leq 80^\circ\text{C}$),
- hartowanie średnio gorące ($80^\circ\text{C} < \theta \leq 130^\circ\text{C}$),
- hartowanie gorące ($130^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}$),
- hartowanie bardzo gorące ($200^\circ\text{C} < \theta \leq 310^\circ\text{C}$).

W zależności od sposobu chłodzenia wyróżnia się:

- hartowanie zwykłe, polegające na ogrzaniu, a następnie szybkim ochłodzeniu hartowanego detalu,
- hartowanie przerywane; detal po nagraniu jest schładzany w wodzie do temperatury około 300°C, a następnie w oleju lub pozostawiany w powietrzu (aby przemiana austenitu w martenzyt odbywała się wolniej), w efekcie uzyskuje się zmniejszenie naprężeń i kruchości,
- hartowanie stopniowe, polegające na nagraniu i wygrzaniu detalu, jak podczas hartowania zwykłego, a następnie oziębieniu w kąpeli solnej o temperaturze nieco wyższej od temperatury początku przemiany martenzytycznej, w czasie niezbędnym do wyrównania temperatury w całym przekroju detalu, a następnie schłodzeniu w powietrzu; w efekcie uzyskuje się martenzytyczną strukturę stali, bez powstawania naprężeń,
- hartowanie izotermiczne, polegające na ochłodzeniu w czynniku chłodzącym o temperaturze wyższej od temperatury początku przemiany martenzytycznej i utrzymaniu detalu w tej temperaturze, aż do zakończenia przemiany austenitu w bainit; w takim przypadku proces przebiega bez przemiany martenzytycznej, a detal nie wymaga stosowania odpuszczania.

Współczesne piece hartownicze pozwalają na prowadzenie procesu hartowania w sposób ciągły. Są to skomplikowane maszyny z układami sterowania pozwalającymi na zadanie przebiegu procesu hartowania i jego kontrolę.

W szczególnych przypadkach są stosowane piece hartownicze, w których atmosfera jest kontrolowana. Przykładowy schemat takiego pieca hartowniczego (typu IBSEN), z kontrolowaną atmosferą (azot, dwutlenek węgla), przedstawiono na rys. 18.2.



Rys. 18.2 Piec do hartownicy typu IBSEN, z kontrolowaną atmosferą
 1 – pokrywa, 2 – turbinka, 3 – silnik turbiny, 4 – przegroda wewnętrzna, 5 – ceramiczny promiennik rurowy, 6 – zaczep, 7 – mufła, 8 – olej hartowniczy, 9 – mieszadło oleju

W niektórych przypadkach zachodzi potrzeba bardzo szybkiego schładzania hartowanych detali. Wówczas do hartowania są stosowane ciekłe gazy.

Rezultaty procesu hartowania zależą od wielu czynników, do których zalicza się:

- kształt, rodzaj powierzchni i masę detalu,
- temperaturę i czas wygrzewania,
- sposób chłodzenia hartowanego detalu.

Efekty hartowania zależą również od tzw. hartowności stali – jest to zdolność stali do tworzenia struktury martenzytycznej podczas chłodzenia. Ocenę hartowności stali wykonuje się na specjalnych kształtkach (próba hartowania od czoła), metodami obliczeniowymi (metoda Grossmanna) lub doświadczeń praktycznych (metoda Lamonta). Miarą hartowalności stali jest grubość zahartowanej warstwy. Określa się ją jednym z następujących parametrów:

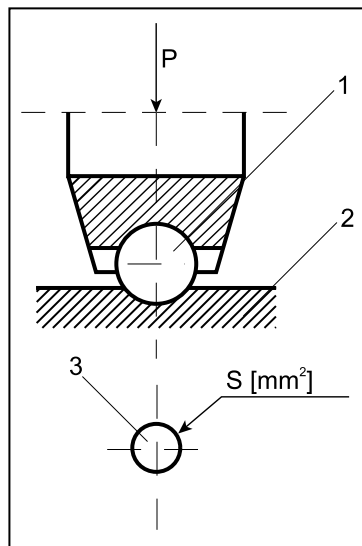
- odległością granicy zahartowania od czoła detalu, w tzw. próbie hartowania od czoła,
- średnicą hartowanych prętów,
- grubością hartowanych płyt.

Hartowność stali zależy od jej składu chemicznego, a zwłaszcza:

- zawartości węgla,
- zawartości pierwiastków (metali) innych niż żelazo, takich jak: chrom (Cr), nikiel (Ni), mangan (Mn), kobalt (Co), wolfram (W), molibden (Mo), wanad (V), krzem (Si) i w mniejszym stopniu innych.

Efekty hartowania są oceniane na podstawie pomiarów kilku podstawowych parametrów, charakteryzujących hartowany materiał:

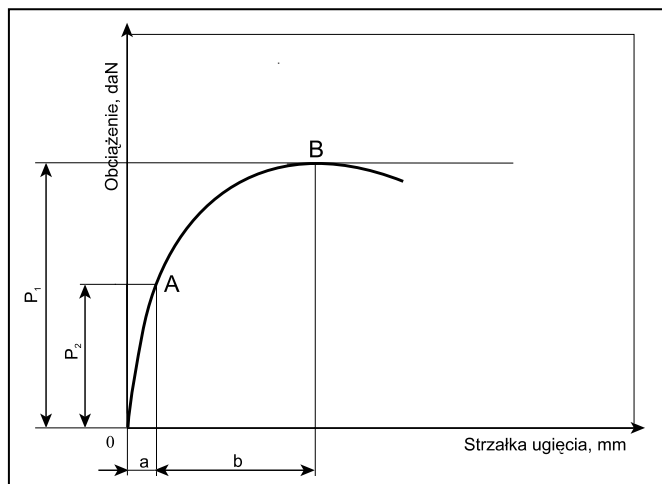
- próba twardości wg Brinella, której zasadę pomiaru, przedstawia rys. 18.3,



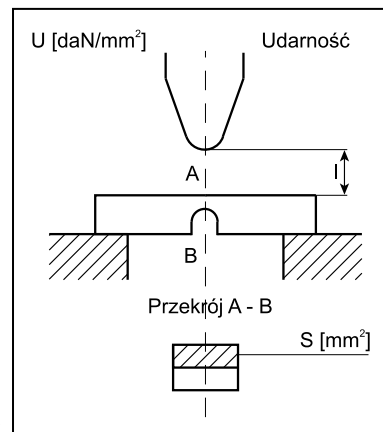
Rys. 18.3 Zasada pomiaru twardości metodą Brinella
 1 – kula, 2 – badany metal, 3 – odcisk na próbce

- próba zginania do wyznaczenia granicy plastyczności i wytrzymałości na zginanie, dla której zależność strzałki ugięcia od przyłożonego obciążenia, przedstawia rys. 18.4,

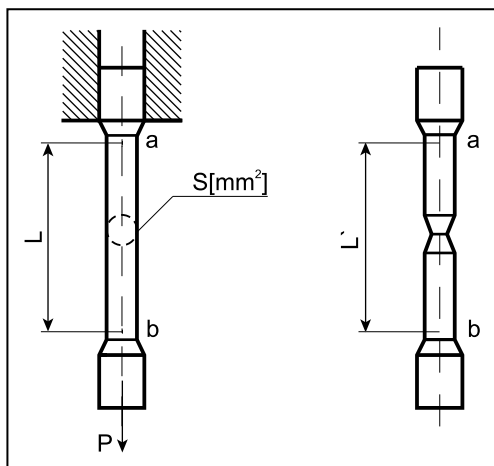
$$R_r = \frac{P[\text{daN}]}{S[\text{mm}^2]} \quad (18.1)$$



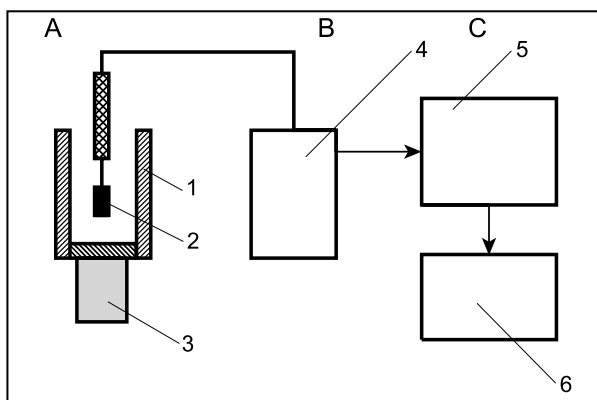
Rys. 18.4 Zależność strzałki ugięcia i od przyłożonego obciążenia
 a – granica sprężystości, b – granica plastyczności, P – obciążenie, S – powierzchnia przekroju



Rys. 18.5 Zasada pomiaru udarności
 W – praca złamania, S – powierzchnia przekroju AB



Rys. 18.6 Próba na rozciąganie
L – pierwotna długość próbki, L' – długość próbki po próbie, P – przyłożona siła rozciągająca



Rys. 18.7 Schemat zestawu aparaturowego do oceny hartowności stali i właściwości olejów hartowniczych
A – część pomiarowa, B – zbieranie i przetwarzanie danych, C – komputerowa obróbka wyników, 1 – osłona, 2 – pręt srebrny (badanie właściwości olejów) lub z badanej stali (badanie hartowności stali), 3 – olej hartowniczy, 4 – zapis danych, 5 – komputer i ploter, 6 – pamięć

- kruchości, której zasadę pomiaru, przedstawia rys. 18.5,

$$U = \frac{W [\text{mdaN}]}{S [\text{mm}^2]} \quad (18.2)$$

- wydłużenia, którego zasadę pomiaru, przedstawia rys. 18.6.

$$A[\%] = \frac{(L' - L) * 100}{L} \quad (18.3)$$

Współcześnie hartowność stali jest oceniana w specjalnych zestawach aparaturowych, których zasadniczym elementem jest przyrząd zwany drastycyometrem. Schemat układu pomiarowego, przedstawia rys. 18.7. Pomiar polega na nagraniu próbki metalu (srebra), zanurzeniu próbki do czynnika chłodzącego i wyznaczeniu przebiegu zmian temperatury w funkcji czasu chłodzenia. Obliczenia są wykonywane na podstawie specjalnych programów komputerowych.

18.2 Klasyfikacje płynów hartowniczych

Środki chłodzące (płyny hartownicze), w których następuje proces hartowania to:

- oleje hartownicze na bazie mineralnej,
- oleje hartownicze na bazie syntetycznej,
- woda,
- emulsje lub roztwory wodne,
- stopione sole,
- gazy,

- złoże fluidalne,
- inne.

Według normy ISO 6743-14, płyny hartownicze są zaliczane do klasy L (Lubricants – środki smarne) i dzielone na 26 rodzajów. Każdy rodzaj ma przydzielony kod literowy, składający się z litery U (Heat treatment – obróbka cieplna), który jest symbolem grupy oraz jednej z liter:

H, A, S, G, F, K, oznaczającej zakres stosowania:

H – oleje hartownicze typu mineralnego,

A – ciecze na bazie wodnej, w tym roztwory wodne polimerów,

S – roztopione sole,

G – gazy,

F – złoże fluidalne,

K – pozostałe klasy.

W symbolu płynu hartowniczego jego rodzaj oznaczają kolejne litery alfabetu, umieszczone na końcu symbolu literowego.

Symbol płynu hartowniczego może być uzupełniony liczbą, oznaczającą klasę lepkościową wg ISO 3448. Niektóre firmy zamiast klasy lepkościowej wg ISO, w symbolu oleju podają lepkość kinematyczną w temperaturze 40°C. Wyciąg z klasyfikacji ISO 6743-14, przedstawiono w tabeli 18.1.

Przykładowo symbol: ISO-L-UHA 15 oznacza:

ISO – kod klasyfikacji,

L – środki smarne,

U – płyny hartownicze,

H – oleje hartownicze,

A – oleje do normalnego hartowania (o dużej zdolności chłodzenia),

15 – klasa lepkości wg ISO 3448.

Z praktycznego punktu widzenia oleje hartownicze często są dzielone na:

- **Oleje „zimne”** – niskotemperaturowe.

Temperatura pracy tych olejów podczas hartowania nie powinna być wyższa niż 80°C. Znajdują one zastosowanie w przypadku hartowania:

- detali wykonanych ze stali o dobrej hartowności,
- detali wykonanych z konstrukcyjnych stali węglowych i niskostopowych,
- stali łożyskowych;

- **Oleje „ciepłe”** – średnotemperaturowe.

Temperatura pracy tych olejów powinna zawierać się w granicach 80°C... 120°C. Oleje te stosuje się w stanie podgrzanym. Znajdują one zastosowanie w przypadku hartowania:

- stali konstrukcyjnych o dużej i średniej zawartości węgla oraz stali stopowych,
- części samochodowych,
- w przypadku niestandardowej obróbki cieplnej;

- **Oleje „gorące”** – wysokotemperaturowe.

Temperatura pracy tych olejów powinna zawierać się w granicach 120°C... 180°C. Znajdują one zastosowanie w przypadku:

- stali stopowych, w procesach ciągłego lub stopniowego hartowania martenzytycznego,
- detali podatnych na odkształcenia hartownicze,
- przekładni zębatych.

- **Oleje „bardzo gorące”**.

Temperatura pracy tych olejów może być wyższa niż 180°C. Znajdują one zastosowanie w przypadku procesów:

- stopniowego hartowania martenzytycznego,
- hartowania izotermicznego (kwasobainitycznego).

Tabela 18.1 Klasyfikacja płynów do obróbki cieplnej metali, klasa ISO-L-U wg ISO 6743-14: 1994

Zastosowanie	Bardziej szczegółowe zastosowanie	Typ płynu i/lub zalecane funkcje	Symbol ISO-L
Oleje do obróbki cieplnej	Zimne hartowanie $\theta \leq 80^{\circ}\text{C}$	Oleje do normalnego hartowania	UHA
		Oleje do szybkiego hartowania	UHB
	Średnio gorące hartowanie $80^{\circ}\text{C} < \theta \leq 130^{\circ}\text{C}$	Oleje do normalnego hartowania	UHC
		Oleje do szybkiego hartowania	UHD
	Gorące hartowanie $130^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$	Oleje do normalnego hartowania	UHE
		Oleje do szybkiego hartowania	UHF
	Bardzo gorące hartowanie $200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 310^{\circ}\text{C}$	Oleje do normalnego hartowania	UHG
Oleje do szybkiego hartowania		UHH	
	Hartowanie próżniowe		UHV
	Inne przypadki		UHK
Ciecze wodne do cieplnej obróbki	Powierzchniowe hartowanie	Woda	UAA
		Ciecze wodne do wolnego hartowania	UAB
		Ciecze wodne do szybkiego hartowania	UAC
	Głębokie hartowanie	Woda	UAA
		Ciecze wodne do wolnego hartowania	UAD
		Ciecze wodne do szybkiego hartowania	UAE
	Inne przypadki		UAK
Stopione sole do cieplnej obróbki	$150^{\circ}\text{C} < \theta < 500^{\circ}\text{C}$	Stopione sole $150^{\circ}\text{C} < \theta < 500^{\circ}\text{C}$	USA
	$500^{\circ}\text{C} \leq \theta < 700^{\circ}\text{C}$	Stopione sole $500^{\circ}\text{C} \leq \theta < 700^{\circ}\text{C}$	USB
	Inne przypadki		USK
Gazy do cieplnej obróbki		Powietrze	UGA
		Neutralne gazy	UGB
		Redukujące gazy	UGC
		Utleniające gazy	UGD
Fluidalne złoże			UF
Inne przypadki			UK

18.3 Oleje hartownicze

18.3.1 Skład chemiczny olejów hartowniczych

Jako oleje hartownicze są to czyste (bez dodatków) parafinowe oleje mineralne, z zawartością siarki w granicach 0,10...1,0%, a także oleje roślinne. Niekiedy do składu olejów hartowniczych są wprowadzane dodatki uszlachetniające:

- przyspieszacze hartowania (środki zwilżające),
- przeciwutleniające (inhibitory utlenienia),
- wiskozatory (modyfikatory lepkości).

Wpływ rodzaju oleju na przebieg temperatury hartowanego metalu (krzywa pochodna) pokazano na rys. 18.8.

Na przebieg zmian temperatury hartowanego metalu ma również wpływ mieszanie oleju podczas hartowania. Uwidoczniło to na rys. 18.9.

Obecność w olejach hartowniczych węglowodorów aromatycznych i olefin pogarsza parametr jakim jest skłonność oleju do koksowania i wydzielania osadów, a także inne właściwości eksploatacyjne.

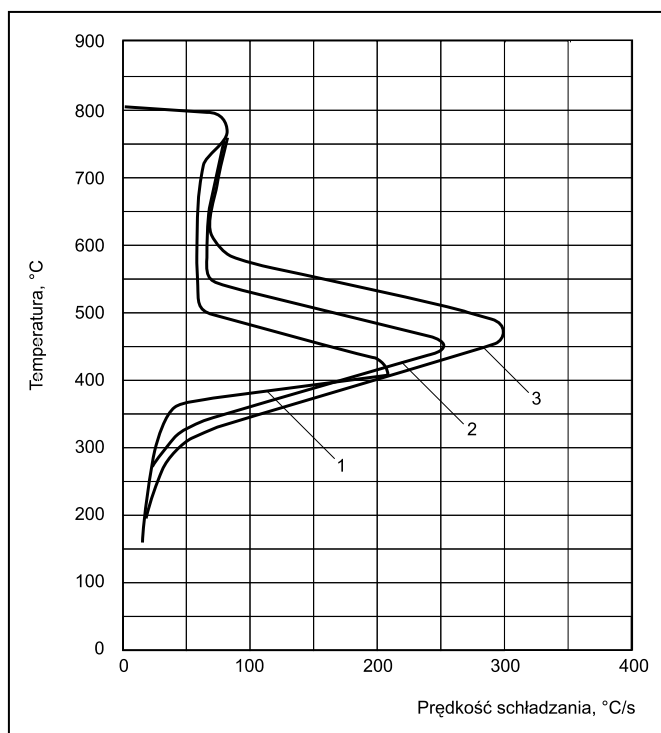
18.3.2 Dodatki do olejów hartowniczych

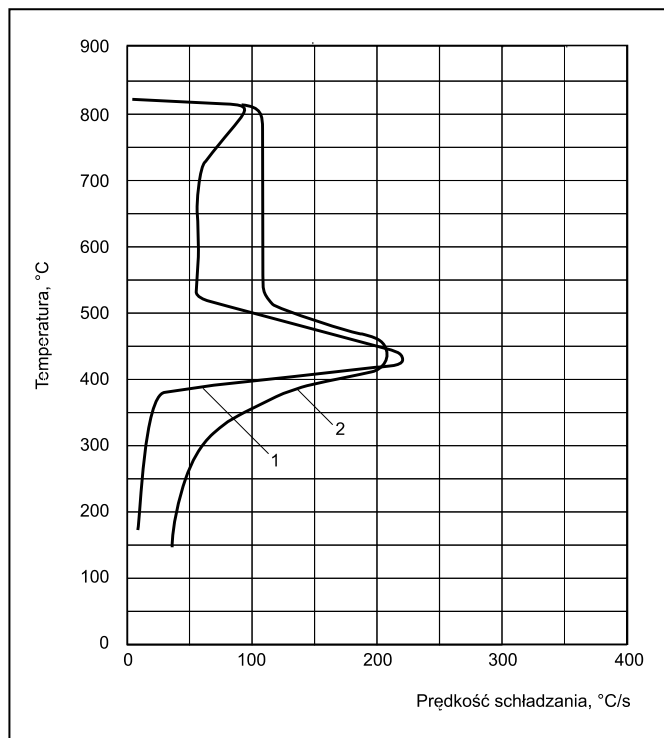
- W zależności od potrzeb, w celu modyfikacji procesu hartowania, niekiedy do oleju jest wprowadzana niewielka ilość

Rys. 18.8 Przebieg zmian temperatury hartowanego metalu (krzywa pochodna – patrz rys. 18.12) od składu oleju hartowniczego
 1 – parafinowy olej mineralny o lepkości kinematycznej $20 \text{ mm}^2/\text{s}$,
 2 – olej mineralny jak 1 z dodatkiem 10% oleju roślinnego,
 3 – olej mineralny jak 1 z dodatkiem 2% substancji powierzchniowo aktywnej

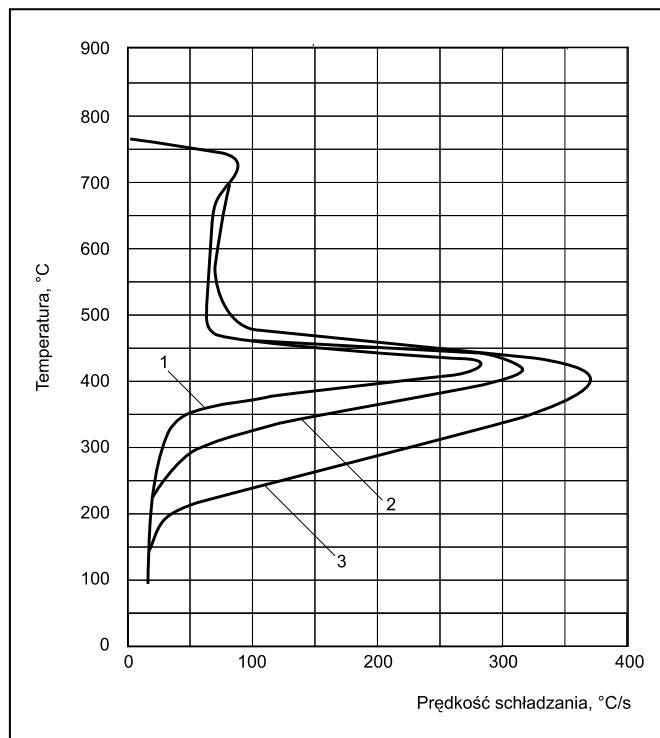
wody. Czasami, obecność wody uznaje się za szkodliwą dla przebiegu procesu hartowania. Woda tworzy emulsję z olejem. Na rys. 18.10, przedstawiono przebieg zmian temperatury hartowanego metalu w zależności od zawartości wody w oleju hartowniczym.

- Przyspieszacze hartowania są to substancje, których zasada





Rys. 18.9 Przebieg zmian temperatury hartowanego metalu (krzywa pochodna – patrz rys. 18.12) od mieszania oleju podczas hartowania
1 – bez mieszania, 2 – z mieszaniem



Rys. 18.10 Przebieg zmian temperatury hartowanego metalu (krzywa pochodna – patrz rys. 18.12) od zawartości wody w oleju hartowniczym
1 – olej bezwodny, 2 – olej z dodatkiem 100 ppm wody, 3 – olej z dodatkiem 500 ppm wody

działania polega na zwiększeniu zwilżalności metalu przez olej. W ten sposób z powierzchni metalu są usuwane pęcherzyki gazu, a tym samym odprowadzenie ciepła jest lepsze, co powoduje szybsze chłodzenie hartowanej powierzchni metalu.

- Inhibitory utlenienia opóźniają procesy starzenia oleju powodowane wysoką temperaturą i kontaktem z tlenem z powietrza, w obecności katalizujących te procesy metali i tlenków metali.
- Stosowanie wiskozatorów w składzie olejów hartowniczych ma na celu zwiększenie lepkości, która dla procesu hartowania ma pewne znaczenie, co omówiono dalej.
- Niektóre oleje hartownicze zawierają emulgatory (zmywacze). Ułatwiają one zmywanie oleju z zahartowanych detali przy użyciu wody. Takie oleje są nazywane „zmywalnymi”. Niekiedy emulgatory są wprowadzane do oleju hartowniczego na specjalne życzenie użytkownika. Stosowanie zmywalnych olejów hartowniczych pozwala na poprawę ekonomiczności procesu hartowania. Oszczędności wynikają ze zmniejszenia energii niezbędnej do podgrzewania wodnych roztworów detergentów oraz kosztów samych detergentów, jakie muszą być poniesione w przypadku stosowania olejów nie zmywalnych.
- Niekiedy do olejów hartowniczych są wprowadzane specjalne dodatki zapobiegające rozwojowi mikroorganizmów – biocydy.

W niektórych przypadkach, w procesie hartowania są stosowane rozpuszczalne w wodzie ciecze hartownicze, w skład których wchodzi:

- poliglikole,
- dodatki przeciwrzdzewne,
- dodatki przeciwpienne,
- przyspieszacze hartowania,
- biocydy.

18.3.3 Wymagania stawiane olejom hartowniczym

Od olejów hartowniczych wymaga się:

- małej zawartości lotnych składników; powodują one ubytki oleju wskutek parowania i niekorzystnie wpływają na olej, obniżając temperatury zapłonu i palenia,

- możliwie wysokiej temperatury zapłonu i palenia, co jest istotnym parametrem dla zagrożeń pożarowych, występujących w procesie hartowania,
- odporności na utlenianie i stabilności chemicznej; im lepsza odporność na utlenianie i stabilność chemiczna – tym dłuższa praca oleju w układzie i tym lepsza ekonomiczność procesu hartowania,
- braku skłonności do koksowania; wydzielane koksy zanieczyszczają olej hartowniczy, osadzają się na hartowanych detalach, a także powodują ciemnienie oleju,
- braku skłonności do pienienia; powstająca piana może powodować wypływanie oleju ze zbiornika, a także być przyczyną niewłaściwego przebiegu procesu hartowania,
- odpowiedniej lepkości, od której istotnie zależy przebieg procesu chłodzenia,
- małej liczby kwasowej; liczba kwasowa świadczy o poprawności zastosowanej technologii produkcji oleju. W przypadku zbyt wysokiej liczby kwasowej, olej może wykazywać skłonność do wywoływania korozji hartowanych detali, a także niekorzystnie wpływać na matowienie ich powierzchni,
- dobrych właściwości przeciwrzdzewnych,
- braku zawartości wolnej lub zemulgowanej wody; powoduje ona „trzaski” oleju podczas procesu hartowania, w wyniku gwałtownego wrzenia następuje wypryskiwanie oleju, a także może być ona powodem korozji detali,
- braku skłonności do wydzielania osadów; skłonność oleju do wydzielania osadów jest powodem skrócenia okresu pracy oleju, a często przyczyną złej jakości powierzchni hartowanych detali,
- kompatybilności z materiałami konstrukcyjnymi urządzeń hartowniczych, mających bezpośredni kontakt z olejem hartowniczym,
- odporności na rozwój mikroorganizmów; dotyczy to olejów hartowniczych stosowanych jako emulsje wodno-olejowe.

Obecnie dla olejów hartowniczych, brak jest norm międzynarodowych, regionalnych czy krajowych, regulujących ich jakość. Większość użytkowników posługuje się wymaganiami producen-

tów pieców hartowniczych, wewnętrznymi wymaganiami producentów olejów hartowniczych lub danymi katalogowymi olejów oferowanych przez poszczególne firmy.

18.4 Specyficzne metody badań

Jakość olejów hartowniczych jest oceniana metodami standardowymi, właściwymi dla innych olejów przemysłowych i technologicznych, a także metodami specyficznymi dla tej grupy olejów.

Zestaw metod standardowych, najczęściej stosowanych do oceny jakości olejów hartowniczych przedstawiono w tabeli 18.2.

Obok parametrów standardowych, oleje hartownicze są oceniane na podstawie parametrów eksploatacyjnych.

Podstawowym parametrem eksploatacyjnym jest tzw. **zdolność chłodząca** – określająca szybkość, z jaką olej (ciecz) chłodzi nagrzaną materię. Jest ona oceniana przy użyciu aparatu zwanego drastycymetrem – na podstawie pomiarów wartości θ_1 i θ_2 .

W drastycymetrze, srebrny próbnik, wyposażony w termoparę, jest nagrzewany do temperatury 800°C, a następnie schładzany w próbce czynnika chłodzącego (np. oleju). Na podstawie rejestrowanych zmian temperatury w czasie, są wyznaczane dwie krzywe:

- przebieg zmian temperatury wnętrza srebrnego próbника (θ_c), w funkcji czasu (t), zgodnie z zależnością opisaną funkcją (18.4):

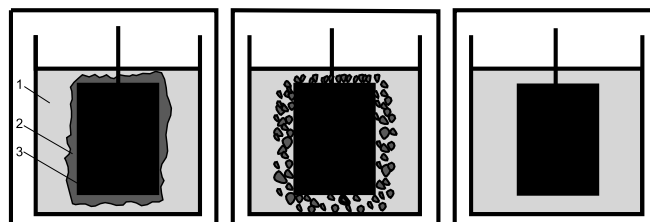
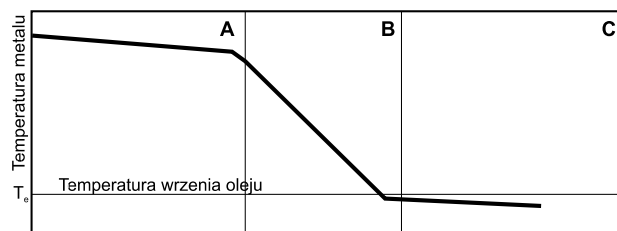
$$\theta_c = f(t) \quad (18.4)$$

- przebieg zmian temperatury wnętrza srebrnego próbника (θ_c), w funkcji szybkości chłodzenia (18.5):

$$\theta_c = f\left(\frac{d\theta_c}{dt}\right) \quad (18.5)$$

Przebieg zmian temperatury próbника (hartowanego detalu) oraz zachodzące zjawiska, ilustruje rys. 18.11.

- **W fazie I (kalefakcja – ciągła powłoka gazowa)** nagrzaną, hartowany detal, po zanurzeniu w oleju wytwarza ciągłą otulinę gazową, która izoluje go od oleju. W etapie tym, w wyniku izolacji przez warstwę gazu o małym przewodnictwie cieplnym, chłodzenie jest stosunkowo powolne.
- **W fazie II (wrzenie pęcherzykowe)** – detal w wyniku obniżenia temperatury, uzyskuje bezpośredni kontakt z olejem, co powoduje wrzenie oleju, a burzliwie wydzielające się pęcherzyki gazu powodują dopływ świeżych (chłodniejszych) porcji oleju. Obniżanie temperatury chłodzonego detalu jest szybkie. Na tym etapie hartowany detal osiąga temperaturę przemiany.

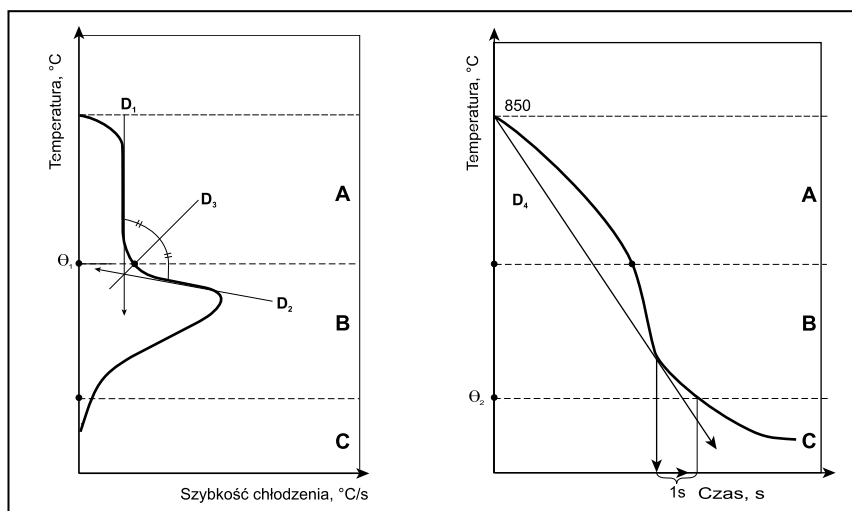


Rys. 18.11 Fazy procesu hartowania
A – faza I ciągłej powłoki parowej – kalefakcji, B – faza II wrzenia pęcherzykowego, C – faza III konwekcji. 1 – ciecz hartownicza, 2 – hartowany element, 3 – faza gazowa

- **W fazie III (konwekcja)** temperatura powierzchni chłodzonego detalu pozwala na ciągły bezpośredni kontakt z olejem. Odprowadzanie ciepła następuje w wyniku konwekcji. Następuje powolne schładzanie detalu aż do temperatury nieco wyższej niż temperatura oleju.

Na podstawie wyznaczonych krzywych, opisanych funkcjami (18.4) i (18.5), przedstawionymi odpowiednio na rys. 18.13 i 18.12, są wyznaczane temperatury określające zdolność chłodzącą czynnika chłodzącego.

Zdolność chłodząca jest charakteryzowana dwoma podstawowymi parametrami:

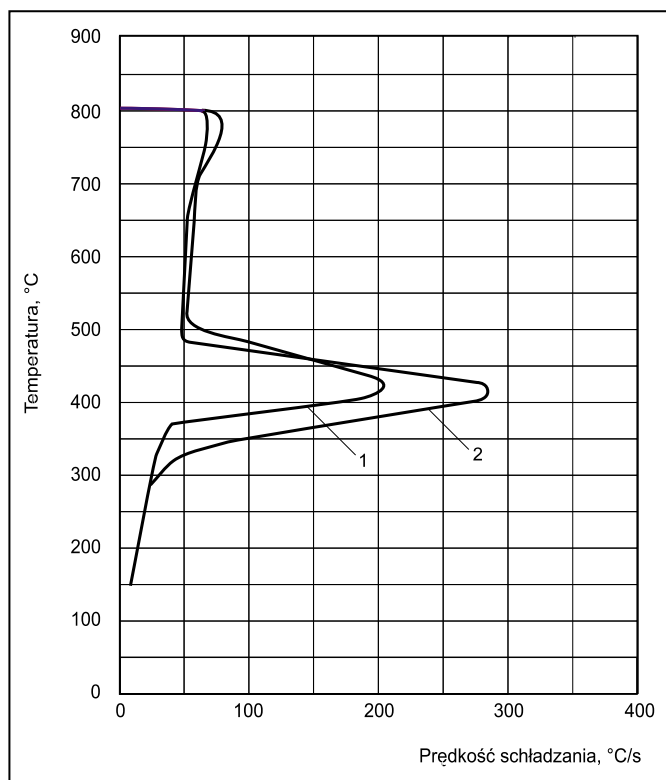


Rys. 18.12 Sposób wyznaczania θ_1 ,
A – kalefakcja, B – wrzenie pęcherzyków, C – konwekcja

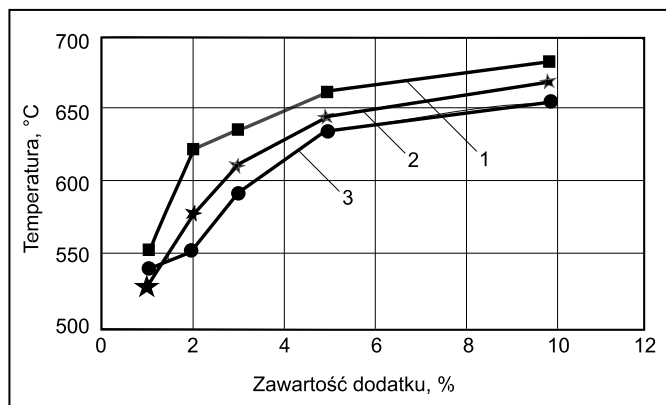
Rys. 18.13 Sposób wyznaczania θ_2

Tabela 18.2 Standardowe, znormalizowane metody badań olejów hartowniczych

Właściwości	Metody badań		
	Międzynarodowe ISO	Amerykańskie ASTM D	Polskie PN-
Barwa	2049	1500	C-04037
Gęstość w temp. 15 °C	3838 3675	1298	EN-ISO 3838 ISO 3675
Lepkość kinematyczna	3104	445	EN-ISO 3104
Wskaźnik lepkości	2909	2270	C-04015
Temperatura zapłonu w tyglu otwartym	2592	92	EN 22592
Temperatura palenia	2592	92	EN 22592
Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym	2719	93	EN 22719
Liczba kwasowa	6618	974	C-04066
Skłonność do pienienia	6247	892	C-04055



Rys. 18.14 Wpływ natury chemicznej bazy oleju hartowniczego na przebieg procesu chłodzenia, przy jednakowej lepkości kinematycznej oleju (20 mm²/s)
1 – baza parafinowa, 2 – baza aromatyczna



Rys. 18.15 Wpływ zawartości różnych dodatków do oleju hartowniczego, na przebieg zmian wartości θ_1 , 1, 2, 3 – różne przyspieszacze hartowania

θ_1 – temperaturą przejścia od fazy I (kalefakcji) do fazy II (wrzenia pęcherzykowego),
 θ_2 – temperaturą przejścia od fazy II (wrzenia pęcherzykowego) do fazy III (konwekcji).

Krzywe wg wzorów (18.4) i (18.5) pozwalają na wyznaczenie temperatur: θ_1 oraz θ_2 , w których następuje zmiana mechanizmu chłodzenia hartowanego materiału. Sposób wyznaczania zilustrowano na rys. 18.12 i 18.13. Kierunki strzałek wyznaczają sposób kreślenia charakterystycznych prostych.

Wartość θ_1 jest wyznaczona na krzywej pochodnej (rys. 18.12) i określona przez temperaturę odpowiadającą punktowi przecięcia się krzywej i dwusiecznej D_3 kąta utworzonego przez styczne D_1 i D_2 do krzywej. Ten punkt na krzywej najlepiej przedstawia temperaturę wrzenia pęcherzykowego.

Wartość θ_2 jest określona na krzywej schładzania (rys. 18.13). Na podstawie wieloletnich doświadczeń, przyjmuje się, że punkt ten jest wyznaczany przez czas odpowiadający punktowi styczności prostej D_4 , poprowadzonej od temperatury 850°C, z krzywą schładzania. Do wyznaczonego w ten sposób czasu, należy dodać 1 sekundę, jeżeli wyznaczona temperatura jest wyższa lub równa 780°C.

Wartości θ_1 oraz θ_2 określają zdolność chłodzącą oleju i są podawane w charakterystykach olejów hartowniczych. Na podstawie znajomości hartowności stali i parametrów charakteryzujących detal, wartości θ_1 oraz θ_2 , dobierany jest czynnik chłodzący (olej) do danego procesu hartowania. W szczególnych przypadkach, dobór czynnika chłodzącego jest dokonywany na podstawie prób hartowania oraz praktycznej wiedzy personelu, prowadzącego proces hartowania.

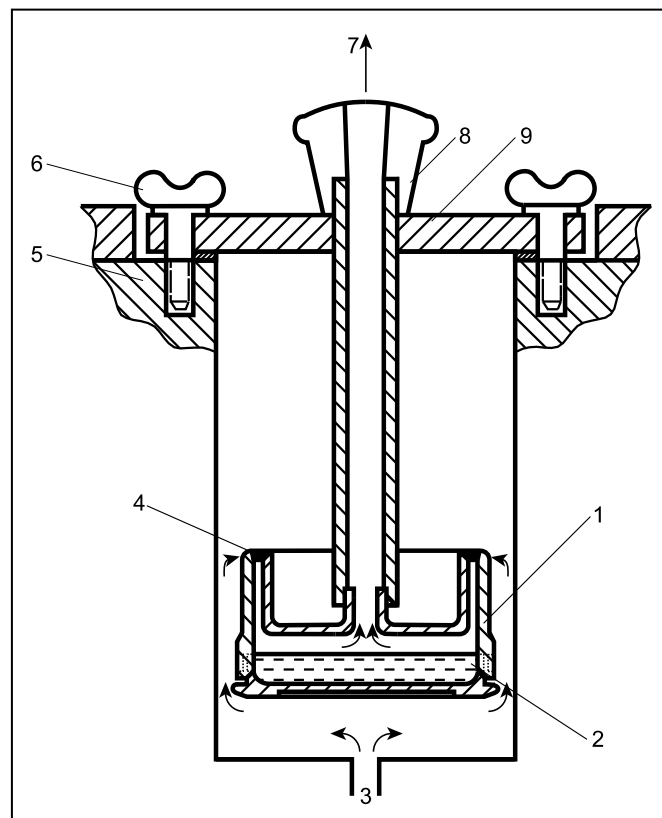
Przy doborze oleju hartowniczego należy mieć na względzie, że wartości θ_1 oraz θ_2 zwiększają się wraz ze zwiększeniem lepkości oleju hartowniczego. Zwiększenie lepkości oleju może być wywołane procesami jego starzenia (utlenianie), co może powodować zmiany warunków hartowania, a w efekcie niepożądanymi właściwościami hartowanego detalu. W takim przypadku olej hartowniczy powinien być wymieniony odpowiednio wcześniej.

Wartości θ_1 oraz θ_2 zależą również od składu grupowego oleju, co ilustruje rys. 18.14, na którym przedstawiono przebieg krzywej chłodzenia (pochodna) oleju hartowniczego na bazie węglowodorów aromatycznych oraz parafinowych.

Na wartość θ_1 ma również wpływ obecność w oleju przyspieszacza hartowania i jego jakość, co przedstawiono na rys. 18.15.

Istotnym parametrem, określającym jakość olejów hartowniczych, są tzw. straty parowania. Olej hartowniczy nie powinien zawierać lotnych frakcji. W procesie hartowania ulatniają się one do atmosfery lub są spalane w specjalnych palnikach, zainstalowanych w piecach hartowniczych. Duża zawartość lotnych frakcji może być przyczyną zapalenia się oleju, zwłaszcza w przypadku obecności w oleju zemulgowanej wody, która po podgrzaniu wrze wynosząc lotne składniki oleju.

Straty parowania są oceniane wieloma metodami, zarówno standardowymi jak i specjalnymi. Do metod standardowych zaliczyć należy pomiar lotnych frakcji metodą wg ASTM D 2595. Metoda ta wymaga stosowania specjalnego aparatu. W metodzie tej, próbka oleju (1) jest umieszczana w komorze badawczej (2) i poddawana ogrzewaniu w grzejnym bloku aluminiowym (3) w ciągu



Rys. 18.16 Cała testowa aparatu do oznaczania zawartości lotnych frakcji w olejach hartowniczych i innych środkach smarnych
1 – naczynie testowe, 2 – badany olej, 3 – wlot powietrza, 4 – otwór wlotowy w naczyniu testowym, 5 – blok aluminiowy, 6 – śruby dociskowe pokrywy, 7 – wylot powietrza i lotnych składników oleju, 8 – uchwyt pokrywy, 9 – pokrywa

22 godzin (rys. 18.16). Nad powierzchnią próbki przepływa podgrzane powietrze, unosząc lekkie składniki oleju. Metoda pozwala na ocenę lotnych frakcji w zakresie temperatury 93...316°C.

Zawartość lotnych składników w oleju (lotność – L) jest obliczana na podstawie wzoru (18.6):

$$L[\%] = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (18.6)$$

gdzie:

M_1 – początkowa masa oleju,

M_2 – masa oleju po próbie.

W przypadku komponowania olejów hartowniczych, ich lotność bywa oceniana metodami derywatograficznymi. Polegają one na pomiarze zmian masy próbki oleju, przy jednostajnym podnoszeniu temperatury, w ustalonych warunkach. Pomiaru są dokonywane przy użyciu specjalnego aparatu, zwanego derywatografem. Duża dokładność metody pozwala na precyzyjny dobór składu oleju oraz eliminację tych składników, które zwiększają lotność oleju.

Przybliżoną ocenę zawartości lotnych składników w oleju, daje znajomość różnicy temperatur zapłonu w tyglu otwartym i zamkniętym. Im ta różnica jest mniejsza, tym mniejsza zawartość lotnych składników, a tym samym olej pod tym względem należy uznać za lepszy. Również, im wyższa temperatura palenia, tym mniejsza zawartość lotnych składników w oleju.

Zmywalność jest to parametr jakości olejów hartowniczych, pozwalający na ocenę, czy dany olej może być usunięty z hartowanego detalu poprzez mycie wodą. Ocena zmywalności jest dokonywana z zastosowaniem metody, polegającej na pomiarze masy oleju, jaki pozostaje na hartowanym pręcie, po zmyciu wodą, w standardowych warunkach.

Ocena **stabilności** oleju hartowniczego ma na celu stwierdzenie: jak długo olej może być użytkowany, bez istotnej zmiany podstawowych parametrów eksploatacyjnych. Pomiar jest wykonywany w warunkach standardowych, przy użyciu aparatu zwanego senilimetrem, a wynik jest podawany jako czas do osiągnięcia określonych zmian jakości oleju hartowniczego w procesie standardowego hartowania.

Sklonność do matowienia powierzchni hartowanego materiału przez olej hartowniczy jest jednym z istotnych parametrów oceny negatywnej przydatności eksploatacyjnej. Ocena polega na kontaktowaniu w specjalnym aparacie kulki wykonanej z hartowanego metalu z badanym olejem.

18.5 Ocena jakości oleju podczas pracy

Dla potrzeb użytkowników została opracowana metodyka kontroli jakości olejów hartowniczych podczas pracy oraz kryteria dopuszczalnych zmian ich jakości. Wraz z bazą danych tworzą one zespół analiz nazwanych LUBIANA (patrz p. 22).

Jakość oleju hartowniczego w eksploatacji należy kontrolować

głównie dlatego, aby sprawdzać czy jego zdolność chłodzenia nie uległa zmianie. Badania te pozwalają również na ocenę:

- obecności wody,
- chemicznego starzenia się oleju w wyniku utleniania lub krakowania.

Posługiwanie się systemem LUBIANA pozwala: z jednej strony na uzyskanie maksymalnie długiego okresu pracy oleju hartowniczego, z drugiej na zachowanie właściwych warunków prowadzonego procesu.

Badanie olejów hartowniczych w eksploatacji polega na wykonaniu określonych badań kontrolnych, zgrupowanych w dwóch zestawach:

podstawowym:

- wygląd oleju,
- zawartość wody (metoda Karla Fischera),
- zawartość substancji nierozpuszczalnych.

specyficznym (poszerzonym):

- liczba kwasowa (TAN),
- temperatura zapłonu.

Interpretację rezultatów badań dla zestawu podstawowego, przedstawiono w tabeli 18.3, a dla zestawu specyficznego, w tabeli 18.4. Pozytywne rezultaty badań w zakresie podstawowym, praktycznie zwalniają z wykonania badań z zestawu specyficznego.

Wyznaczenie krzywej schładzania w toku eksploatacji oleju, pozwala na ocenę zmiany θ_1 i θ_2 , stosownie do rodzaju oleju:

- klasyczny olej hartowniczy:

θ_1 na ogół wzrasta wraz z postępującym procesem utleniania oleju;

- olej hartowniczy doprowadzony do zbyt wysokiej temperatury: θ_1 zmniejsza się wraz ze starzeniem, ale to zmniejszanie może zostać zrekompensowane przez utlenianie oleju;

- olej hartowniczy doprowadzony do niskiej temperatury:

na ogół następuje zmniejszenie θ_1 i zwiększenie θ_2 wraz ze starzeniem.

Tabela 18.3 Interpretacja rezultatów oceny olejów dla podstawowego zestawu badań

Oceniany parametr	Ocena	Diagnoza i zalecane działania
Wygląd oleju	→ przejrzysty	Możliwe dalsze użytkowanie oleju
	→ mętny	Obecność wody do potwierdzenia
Zawartość wody (Karl Fischer)	→ < 0,02%	Możliwe dalsze użytkowanie oleju
	→ > 0,02%	Wymagany nadzór (kontrola) zawartości wody, a także ustalenie źródeł jej przedostawania się do oleju
	→ < 0,05%	
	→ > 0,05%	Woda do usunięcia, z uwagi na ryzyko pryskania i pęknięć
Zawartość substancji nierozpuszczalnych	→ śladowa	Możliwe dalsze użytkowanie oleju
	→ obecne	Obecność produktów utleniania

Tabela 18.4 Interpretacja rezultatów oceny oleju dla zakresu poszerzonego

Zmiana lepkości	Zmiana liczby kwasowej, mg KOH/g	Zmiana temperatury zapłonu, °C	Diagnoza i zalecane działania
$\Delta < \pm 15\%$	$\Delta < \pm 1$	$\Delta < - 30^\circ\text{C}$	Nadzorowanie zmian
$\Delta > \pm 15\%$	$\Delta < \pm 1$	$\Delta < - 30^\circ\text{C}$	Możliwość zmieszania z olejem bardziej lepkiem lub bardziej płynny
$\Delta > + 15\%$	$\Delta > + 1$	$\Delta < - 30^\circ\text{C}$	Utlenianie Wymiana oleju jeśli TAN > 4 Wykonanie krzywych schładzania
$\Delta > - 15\%$	$\Delta < \pm 1$	$\Delta > - 30^\circ\text{C}$	Krakowanie lub zmieszanie z rozpuszczalnikiem – ryzyko zapalenia (pożaru)
$\Delta > - 15\%$	$\Delta > + 1$	$\Delta > - 30^\circ\text{C}$	Krakowanie i utlenianie – wykonać krzywą schładzania – zalecana wymiana oleju

18.6 Pielęgnacja olejów hartowniczych podczas pracy

Okres, w jakim olej hartowniczy może być użytkowany z zachowaniem wymaganych właściwości eksploatacyjnych, istotnie zależy nie tylko od jego jakości, ale także od sposobu jego pielęgnacji. W celu zagwarantowania dłuższej pracy oleju hartowniczego, co jest istotne zwłaszcza w dużych urządzeniach do masowego hartowania detali, powinien on być poddawany zabiegom pielęgnacyjnym, polegającym na:

- okresowym usuwaniu osadów z dna zbiornika,
- okresowej filtracji, filtrami zamontowanymi w urządzeniu hartowniczym lub zewnętrznymi,

- niedopuszczaniu do zawodnienia, np. przez wodę z instalacji chłodniczej,
- natychmiastowym usuwaniu wody, jeżeli przeciek został stwierdzony,
- dokładnym usuwaniu szlamów i resztek oleju, w przypadku jego wymiany na nowy,
- okresowej kontroli jakości, np. zgodnie z zestawem analiz LUBIANA.

Właściwa pielęgnacja oleju hartowniczego pozwala na 2...3-krotne wydłużenie czasu jego pracy, a ponadto gwarantuje założoną jakość wyrobów poddawanych procesowi hartowania.