

Obróbka cieplna polega na zabiegach cieplnych powodujących zmianę struktury materiału, a przez to zmianę jego własności mechanicznych (np. wytrzymałości, sprężystości, twardości), fizycznych, chemicznych lub technologicznych (np. skrawalności). Obróbce takiej poddaje się stale, żeliwa i stopy metali nieżelaznych w stanie stałym. Przebieg obróbki cieplnej zależy od odpowiednio dobranej temperatury nagrzania, szybkości nagrzewania i szybkości chłodzenia. Prawidłowo przeprowadzona obróbka cieplna o właściwie dobranych parametrach jest jedną z technologicznych metod zwiększenia trwałości eksploatacyjnej części pojazdów. W materiałach poddawanych obróbce cieplnej mogą

powstać dodatkowe naprężenia, będące przyczyną zniszczenia obrabianego przedmiotu pod wpływem nawet nieznacznego obciążenia, dlatego tak ważny jest dobór odpowiednich parametrów obróbki. Większość zabiegów obróbki cieplnej prowadzi się w temperaturach, w których występują przemiany strukturalne w stopach.

Podczas obróbki cieplnej występują:

- **operacje cieplne**, czyli części procesu technologicznego (np. hartowanie, wyżarzanie, odpuszczanie);
- **zabiegi cieplne**, czyli części operacji (np. nagrzewanie, chłodzenie, wygrzewanie).

Operacje obróbki cieplnej przedstawiono na rysunku 2.12.

Wszystkie metale w stanie stałym mają budowę krystaliczną, czyli charakteryzują się uporządkowanym, regularnym rozmieszczeniem atomów tworzących przestrzenną sieć krystaliczną. Siatka ta składa się z płaszczyzn krystalograficznych oddalonych od siebie na pewną odległość. W węzłach siatki są rozmieszczone atomy. Rodzaj budowy krystalicznej ma wpływ na własności chemiczne, fizyczne i mechaniczne metalu.



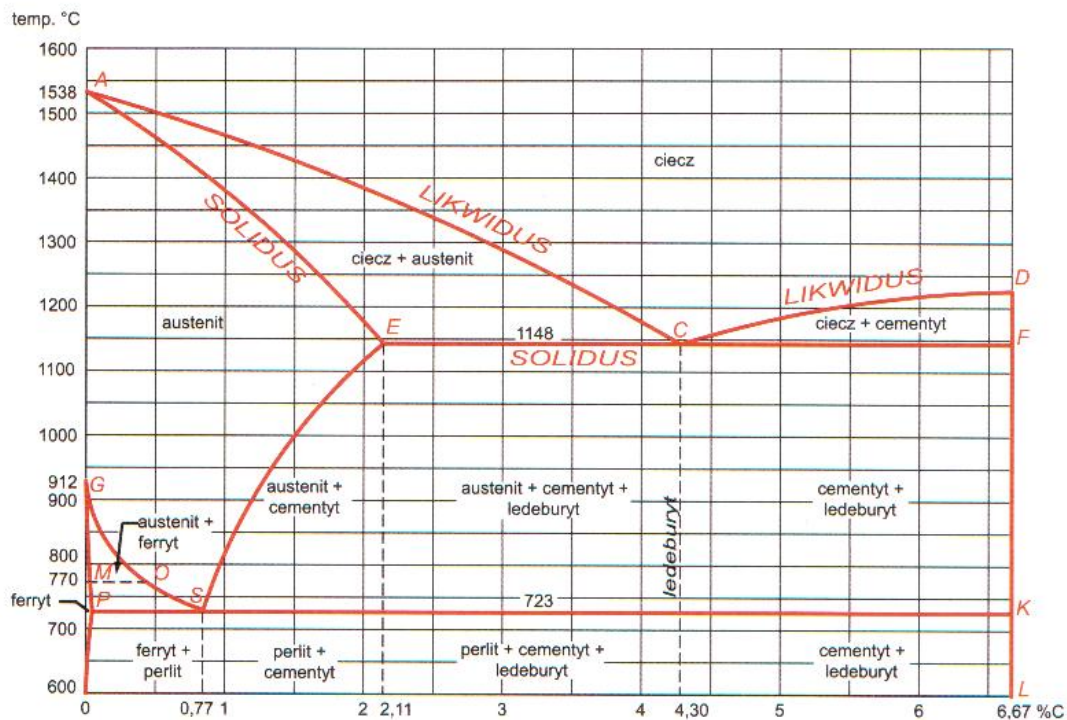
Rys. 2.12 Operacje obróbki cieplnej

Niektóre metale w zależności od warunków (np. temperatury) mogą zmieniać swoją sieć przestrzenną. Powstają wtedy odmiany alotropowe danego metalu, różniące się między sobą budową i właściwościami fizycznymi, chemicznymi i mechanicznymi. W odmianach alotropowych występują żelazo, kobalt, cyna, mangan, tytan. Zjawisko alotropii wykorzystuje się w obróbce cieplnej metali. Żelazo występuje w dwóch odmianach alotropowych oznaczonych greckimi literami α oraz γ , zależnie od zakresu temperatury, w którym dana odmiana może istnieć.

Odmiana α istnieje do temperatury 910°C . Powyżej tej temperatury przechodzi w odmianę γ , która występuje do temperatury 1390°C , powyżej której następuje ponowna przemiana w żelazo α .



Czyste metale krzepną (przechodzą ze stanu ciekłego w stan stały) w stałej, ściśle określonej temperaturze. Stopy metali, które w stanie ciekłym stanowią roztwór jednorodny (o jednakowych własnościach), podczas przechodzenia ze stanu ciekłego w stan stały mogą tworzyć mieszaniny, związki chemiczne lub roztwory stałe. Mieszaniny to takie stopy, które rozpuszczają się w sobie w stanie ciekłym, a nie rozpuszczają się w sobie w stanie stałym, utrzymując odrębne sieci krystaliczne. Podczas tworzenia związków chemicznych tworzy się nowa sieć krystaliczna, inna niż sieci składników stopu. Kryształy roztworu stałego różnią się od mieszaniny tym, że zostaje w nich zachowana sieć krystaliczna, w której obok atomów rozpuszczalnika układają się atomy składników stopu (atomy rozpuszczonego składnika zastępują atomy rozpuszczalnika albo rozmieszczają się między nimi). Uproszczony układ podwójny stopów żelazo-węgiel przedstawiono na rysunku 2.13.



Rys. 2.13 | Uproszczony układ podwójny stopów żelazo-węgiel

Na podstawie tego wykresu można określić przebieg krzepnięcia stopów żelaza z węglem, zmiany zachodzące w stopach w stanie stałym podczas powolnego studzenia oraz strukturę tych stopów po ostudzeniu. Znając zmiany w strukturze stopów, można określić ich własności. Cały wykres obejmuje stopy żelaza z węglem o zawartości węgla od 0% C do 6,67% C (oś pozioma) i zakres temperatur od 0°C do 1600°C (oś pionowa). Każdy punkt wykresu odpowiada stopowi o określonym składzie chemicznym w określonej temperaturze.

Składniki strukturalne stopów żelazo-węgiel, występujące na wykresie z rysunku 2.13, to:

- ferryt, czyli prawie czyste żelazo o niedużej twardości (od 50 do 70 HB), a bardzo dużej plastyczności; jest to roztwór stały węgla w żelazie α , rozpuszczalność węgla jest w nim bardzo mała i wynosi do 0,02%;
- cementyt, czyli węgiel żelaza (Fe_3C) o zawartości węgla 6,67%, który jest bardzo twardy (ok. 800 HB) i kruchy, a podczas nagrzewania do wysokich temperatur rozkłada się na ferryt i węgiel;
- austenit, czyli roztwór stały węgla w żelazie γ o zawartości węgla do 2%, który ma dużą plastyczność, a podczas powolnego chłodzenia poniżej temperatury 723°C rozkłada się na ferryt, cementyt i perlit;
- perlit, czyli mieszanina ferrytu i cementytu, który może występować w dwóch rodzajach, jako płytkowy i ziarnisty; podczas ogrzewania można zmienić budowę perlitu płytkowego na ziarnisty, o lepszych własnościach mechanicznych niż płytkowy; stal o zawartości węgla 0,8% ma strukturę wyłącznie perlityczną.

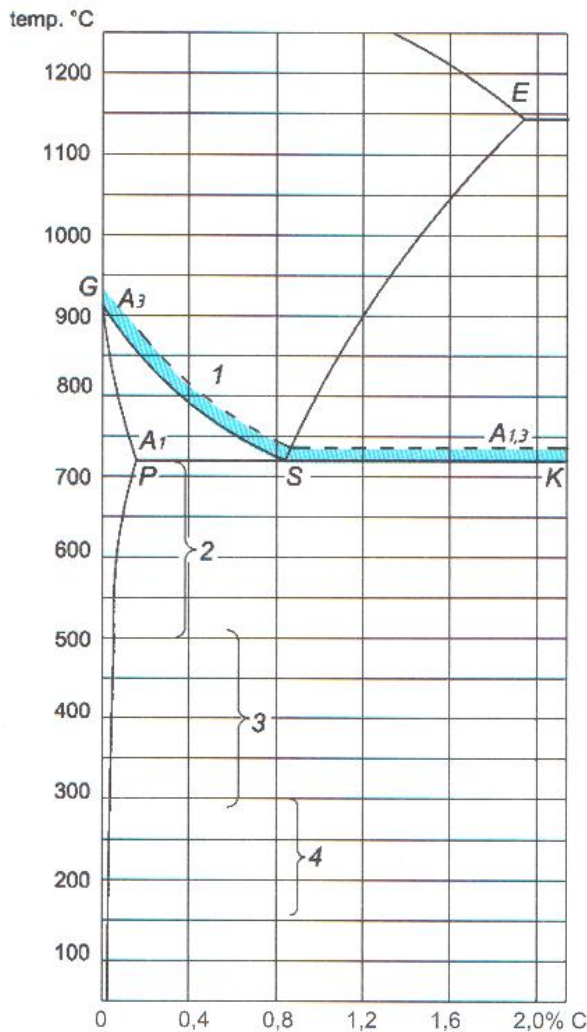
Własności stali zależą od zawartości poszczególnych składników strukturalnych. Stale o małej zawartości węgla (poniżej 0,3%) są plastyczne na zimno i na gorąco. Stale o zawartości węgla ponad 0,8% są twarde i mało plastyczne, ponieważ występuje w nich cementyt. Własności stali zależą także od szybkości chłodzenia. Przy zwiększonej szybkości chłodzenia strukturę perlitu tworzą coraz drobniejsze i gęściej ułożone pasemka cementytu. Twardość takiej struktury wzrasta. Podczas bardzo szybkiego chłodzenia stali, np. w zimnej wodzie, powstaje martenzyt w postaci bardzo twardych igieł.

Na wykresie żelazo-węgiel (patrz rys. 2.13) przedstawiono charakterystyczną linię AC, tzw. linię likwidusu, łączącą punkty początku krzepnięcia; jej nazwa pochodzi od łacińskiego słowa *liquidus* – płynny. Powyżej tej linii wszystkie stopy znajdują się w stanie ciekłym. Czyste żelazo topi się w temperaturze 1538°C – punkt A. Stopy żelaza z węglem topnieją w pewnych zakresach temperatur. Wzdłuż linii likwidusu na odcinku AC zaczyna się wydzielanie kryształów austenitu. Powyżej linii AC znajduje się ciecz, a poniżej niej – ciecz i kryształy austenitu. Na linii AE kończy się proces krystalizacji – jest to linia solidusu łącząca punkty końców krzepnięcia. Jej nazwa pochodzi od łacińskiego słowa *solidus* – stały. Poniżej linii solidusu wszystkie stopy znajdują się w stanie stałym i mają strukturę austenityczną. Wzdłuż linii ES z austenitu zaczyna wydzielać się cementyt. Na linii PSK austenit podczas chłodzenia rozpada się na ferryt, perlit i cementyt. Jak wynika z analizy wykresu żelazo-węgiel, dla określonego składu chemicznego można otrzymać różne struktury, a zarazem zróżnicowane własności materiałów w zależności od przeprowadzonych procesów nagrzewania i chłodzenia, czyli obróbki cieplnej.

Operacje obróbki cieplnej zostaną omówione poniżej na przykładzie stali.

Jedną z podstawowych operacji obróbki cieplnej jest **hartowanie**. Polega ono na nagrzaniu metalu do określonej temperatury, zależnej od rodzaju materiału. Dla stali jest to temperatura o około 30°C wyższa od temperatury przemiany A_3 . Zakres temperatur hartowania przedstawiono na rysunku 2.14. Jest to pas wzdłuż linii A_3 – $A_{1,3}$.

Następnie stal jest wygrzewana w tej temperaturze w celu uzyskania jednakowej temperatury oraz poddawana chłodzeniu. Celem hartowania jest zwiększenie twardości, wytrzymałości i granicy plastyczności stali. Zwiększenie twardości uzyskuje się dzięki utworzeniu struktury martenzytycznej, czyli przesyconego roztworu węgla w żelazie



Rys. 2.14 Zakres temperatur hartowania i odpuszczania stali
 1 – grzanie przed hartowaniem,
 2 – odpuszczanie wysokie,
 3 – odpuszczanie średnie,
 4 – odpuszczanie niskie

α . Schemat operacji hartowania, składającej się z zabiegów nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia, przedstawiono na rysunku 2.15.

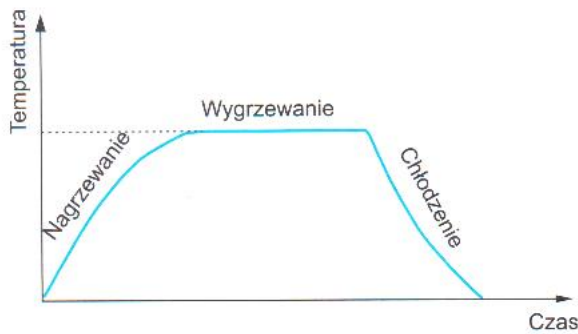
W zależności od sposobu nagrzewania hartowanie można podzielić na:

- powierzchniowe,
- na wskroś.

Hartowanie powierzchniowe polega na bardzo szybkim ogrzaniu powierzchniowej warstwy materiału, a następnie szybkim chłodzeniu. Metoda ta pozwala na uzyskanie twardej, odpornej na ścieranie powierzchni zewnętrznej oraz plastycznego rdzenia. W zależności od sposobu nagrzewania rozróżnia się hartowanie powierzchniowe:

- indukcyjne (ogrzewanie przedmiotu prądami o wysokiej częstotliwości),
- płomieniowe (ogrzewanie przedmiotu za pomocą palnika gazowego),
- kąpielowe (ogrzewanie przedmiotu w gorącej kąpeli solnej).

Hartowanie powierzchniowe stosuje się do obróbki cieplnej kół zębatych, sworzni i czopów wałów korbowych.



Rys. 2.15 Schemat procesu obróbki cieplnej – hartowania stali, składający się z procesów nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia

Do **hartowania na wskroś** zalicza się, w zależności od sposobu chłodzenia, hartowanie:

- zwykłe,
- stopniowe,
- izotermiczne.

Hartowanie zwykłe polega na nagraniu materiału do odpowiedniej temperatury i szybkim chłodzeniu. Czas wygrzewania wynosi od 25 do 50% czasu nagrzewania. Ten typ hartowania stosuje się do nieskomplikowanych części ze stali niestopowych oraz części ze stali stopowych. Po hartowaniu zwykłym stosuje się odpuszczanie, aby pozbyć się naprężeń hartowniczych.

Hartowanie stopniowe polega na nagraniu i wygrzaniu stali tak, jak w hartowaniu zwykłym, a następnie na stopniowym chłodzeniu, najpierw w kąpeli solnej, a następnie w powietrzu, do temperatury otoczenia. Ten rodzaj hartowania nie powoduje powstawania tak dużych naprężeń, jak hartowanie zwykłe. Stosuje się go do hartowania części ze stali stopowych o skomplikowanych kształtach.

Hartowanie izotermiczne (z przemianą w stałej temperaturze) polega na nagraniu materiału tak, jak przy hartowaniu zwykłym, wygrzaniu w tej temperaturze, następnie chłodzeniu w kąpeli saletrzanej lub ołowiowej o temperaturze wyższej niż w hartowaniu stopniowym, a potem chłodzeniu w powietrzu. Zaletą tego sposobu hartowania jest powstawanie bardzo małych naprężeń wewnętrznych, dlatego po tej obróbce nie stosuje się odpuszczania. Hartowanie izotermiczne stosuje się do małych części ze stali niestopowych.

Odpuszczanie ma na celu usunięcie naprężeń wewnętrznych, powstałych w przedmiotach podczas hartowania, i poprawę własności plastycznych. Polega ono na nagraniu wcześniej zahartowanej stali do temperatury 723°C (niższej od temperatury A_1), wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym studzeniu w powietrzu lub w oleju. W zależności od temperatury (patrz rys. 2.14) rozróżnia się odpuszczanie:

- niskie,
- średnie,
- wysokie.

Odpuszczanie niskie prowadzi się w temperaturze $150\text{--}250^{\circ}\text{C}$. Odpuszczanie takie usuwa naprężenia hartownicze, ale zachowuje dużą twardość stali; stosuje się je przy produkcji narzędzi i przyrządów pomiarowych oraz części maszyn ze stali niestopowych.

Odpuszczanie średnie, które prowadzi się w temperaturze 250–500°C, zwiększa sprężystość i wytrzymałość, a zmniejsza kruchość stali; stosuje się je do obróbki cieplnej sprężyn, resorów, matryc, młotów pneumatycznych i części samochodowych.

Odpuszczanie wysokie prowadzi się w temperaturze od 500°C do temperatury A_1 (patrz rys. 2.14). Zwiększa ono wytrzymałość oraz odporność na uderzenia i sprężystość stali. Stosuje się je do obróbki cieplnej części narażonych na uderzenia maszyn pracujących pod obciążeniem, jak np. osie, wały i korbowody.

Ulepszanie cieplne to proces obróbki cieplnej złożony z hartowania i średniego lub wysokiego odpuszczania (w temp. 250–700°C).

Wyżarzanie jest to operacja obróbki cieplnej, która polega na nagrzaniu metalu do żądanej temperatury, wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym chłodzeniu do temperatury otoczenia.

Można rozróżnić wyżarzanie:

- ujednorodniające,
- normalizujące,
- rekrytalizujące,
- zupełne,
- odprężające.

Zakres temperatur wyżarzania przedstawiono na rysunku 2.16.

Wyżarzanie ujednorodniające stali stosuje się w celu uzyskania jednakowego składu chemicznego w całym materiale. Proces ten prowadzi się w temperaturze około 1050–1250°C przez 10–15 godzin.

Wyżarzanie normalizujące umożliwia uzyskanie jednolitej struktury, polepszenie własności wytrzymałościowych i usunięcie naprężeń własnych. Proces ten polega na nagrzewaniu stali do temperatury 30–50°C powyżej linii GSE (rys. 2.16), wygrzaniu w tej temperaturze i chłodzeniu na powietrzu.

Wyżarzanie rekrytalizujące stosuje się w celu usunięcia zgniotu i przywrócenia stali (poddanej wcześniej obróbce plastycznej na zimno) początkowej plastyczności. Prowadzi się je, nagrzewając materiał do temperatury 550–650°C, a następnie wygrzewając go w tej temperaturze i chłodząc na powietrzu.

Wyżarzanie zupełne ma na celu uzyskanie jednolitej, drobnoziarnistej struktury stali, jej dużej ciągliwości i małej twardości, a także usunięcie naprężeń własnych. Proces ten prowadzi się, nagrzewając materiał do temperatury 30–50°C powyżej linii GSK (rys. 2.16), wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym chłodzeniu w wygaszonym piecu. Różnica między wyżarzaniem zupełnym a normalizującym polega na sposobie chłodzenia.

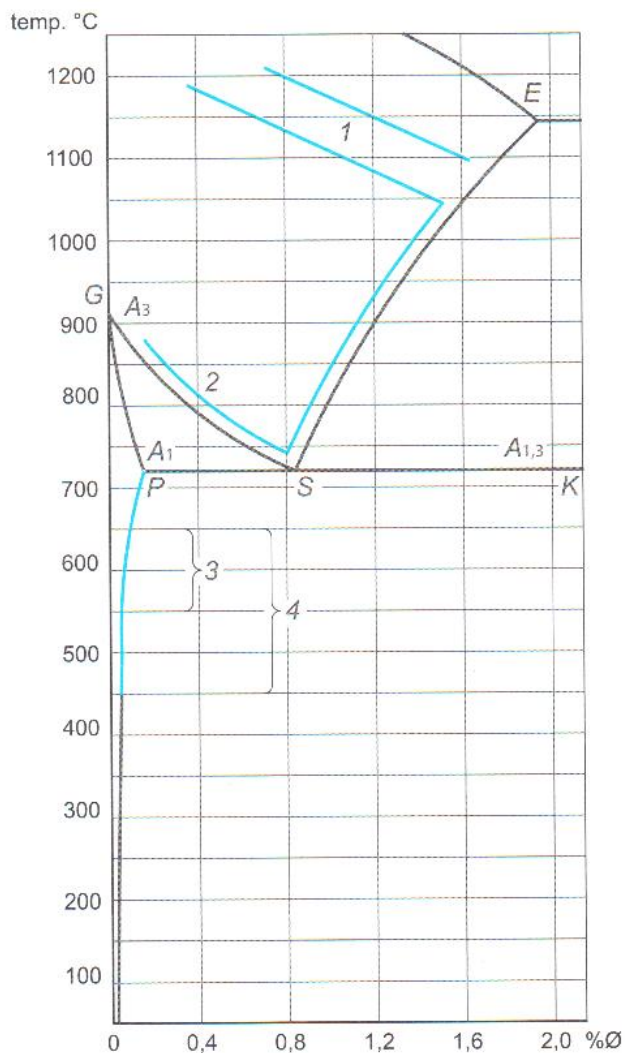
Wyżarzanie odprężające służy zlikwidowaniu naprężeń własnych w materiale. Proces ten prowadzi się, nagrzewając stal do temperatury nieprzekraczającej 450–650°C, wygrzewając ją w tej temperaturze i chłodząc.

Stabilizowanie (dawniej: sezonowanie) jest to operacja mająca na celu zmniejszenie naprężeń własnych i zapewnienie niezmienności wymiarów. Rozróżniamy stabilizowanie:

- naturalne,
- sztuczne.

Stabilizowanie naturalne to długotrwałe (od kilku do kilkunastu miesięcy) przetrzymywanie wyrobów w zmiennych warunkach atmosferycznych.

Stabilizowanie sztuczne polega na nagrzewaniu stali do temperatury 160°C, wygrzewaniu jej w tej temperaturze od kilku do kilkudziesięciu godzin, a następnie chłodzeniu.



Rys. 2.16 Zakres temperatur wyżarzania stali
 1 – ujednorodniającego,
 2 – normalizującego,
 3 – rekrytalizującego,
 4 – odprężającego

Przesycanie to operacja, którą stosuje się, żeby poprawić własności plastyczne stopów oraz zwiększyć ich odporność na korozję. Proces ten prowadzi się, nagrzewając stal do temperatury stanu austenitycznego, wygrzewając w tej temperaturze, a następnie szybko ochładzając. Przesycaniu poddaje się stale kwasoodporne.

2.5 Obróbka cieplno-chemiczna

Obróbka cieplno-chemiczna polega na przeprowadzeniu zabiegów cieplnych powodujących zmianę składu chemicznego zewnętrznych warstw materiału i jego struktury na skutek aktywnego działania chemicznego ośrodka, w którym przedmiot się wygrzewa. Zmiana struktury materiału oraz związana z tym zmiana własności fizycznych i chemicznych następuje na skutek dyfuzji, czyli samorzutnego przemieszczania się atomów

pierwiastka z ośrodka, w którym przeprowadza się obróbkę cieplno-chemiczną, w głąb materiału poddawanego obróbce. Szybkość dyfuzji zależy od czasu przeprowadzonej operacji i zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury. W zależności od pierwiastka wprowadzanego do obrabianego materiału rozróżnia się:

- nawęglanie,
- azotowanie,
- cyjanowanie.

Operacje obróbki cieplno-chemicznej przedstawiono na rysunku 2.17.

Nawęglanie, inaczej cementowanie, polega na nasyceniu węglem zewnętrznej warstwy przedmiotu na głębokość 0,5–2,5 mm. Umożliwia to, po późniejszym zahartowaniu przedmiotu, uzyskanie twardej i odpornej na ścieranie warstwy zewnętrznej (tzw. warstwy wierzchniej) z zachowaniem miękkiego rdzenia. Ze względu na środowisko, w którym jest prowadzone, rozróżnia się nawęglanie:

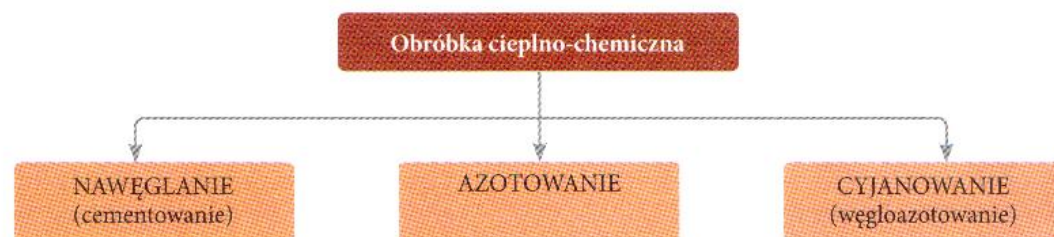
- **w środowiskach stałych** (w proszkach), polegające na użyciu węgla drzewnego z dodatkiem węglanów, którymi zasypuje się obrabiany przedmiot, a następnie w specjalnej skrzynce wygrzewa się go w piecu;
- **w środowiskach gazowych**, polegające na doprowadzeniu do komory pieca, w której znajduje się przedmiot, gazu nawęglającego, np. gazu ziemnego z domieszką propanu;
- **w środowiskach ciekłych**, przeprowadzane w piecach wannowych, w których znajdują się sole nawęglające.

Proces nawęglania stosuje się do przedmiotów stalowych o zawartości węgla do 0,25%. Nawęglanie wykorzystuje się w produkcji wałów korbowych, wałów rozrządu, osi, tulei i kół zębatach.

Azotowanie polega na nasyceniu azotem zewnętrznej warstwy przedmiotu w podwyższonej temperaturze, wynoszącej 500–850°C. Warstwa zewnętrzna przedmiotu zostaje wówczas utwardzona (bez hartowania) oraz staje się odporna na korozję i ścieranie. W zależności od ośrodka azotowanie można podzielić na:

- **gazowe** – do komory pieca, w której znajduje się przedmiot, doprowadza się amoniak, pod wpływem temperatury rozkładający się na azot i wodór;
- **ciekłe** (kąpielowe) – przedmiot wygrzewa się w kąpielach stopionych soli zawierających związki cyjanowe, które pod wpływem temperatury rozkładają się z wydzielaniem azotu i węgla; to azotowanie jest stosowane do przedmiotów ze stali lub żeliwa, mających w swoim składzie związki aluminium, chromu lub molibdenu.

Azotowanie wykorzystuje się do produkcji części narażonych na ścieranie przy niedużych naciskach, np. wałów korbowych, ślimaków i tulei cylindrów.



Rys. 2.17 Operacje obróbki cieplno-chemicznej

Cyjanowanie, inaczej węglazotowanie, polega na nasyceniu powierzchni przedmiotów jednocześnie węglem i azotem w temperaturze 500–950°C. Po późniejszym hartowaniu warstwa zewnętrzna takiego przedmiotu ma większą odporność na ścieranie i twardość.

W zależności od ośrodka cyjanowanie dzieli się na:

- **gazowe**, polegające na wygrzewaniu przedmiotu w mieszaninie amoniaku i gazu nawęglającego;
- **ciekłe** (kąpielowe), polegające na wygrzewaniu przedmiotu w stopionych solach zawierających cyjanek sodu (NaCN jest substancją trującą!) i sól obojętną.

Ten rodzaj obróbki wykorzystuje się do produkcji stalowych części urządzeń pomiarowych i precyzyjnych, odpornych na ścieranie, narzędzi tnących, kół zębatych, sworzni tłokowych i części sprzęgła.

Nawęglanie, azotowanie i cyjanowanie należą do najczęściej stosowanych w przemyśle maszynowym operacji obróbki cieplno-chemicznej. W zależności od pierwiastka wprowadzanego przez dyfuzję do warstwy powierzchniowej przedmiotu wyróżnia się także **inne, rzadziej stosowane rodzaje obróbki cieplno-chemicznej**, np.:

- nachromowywanie (nasycanie chromem),
- naborowywanie (nasycanie borem),
- nakrzemowywanie (nasycanie krzemem),
- nasiarczanie (nasycanie siarką).