



MINISTERSTWO EDUKACJI
i NAUKI



Waldemar Kula

**Wykonywanie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej
311[20].Z1.01**

Poradnik dla ucznia

Wydawca

**Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy
Radom 2005**

Recenzenci:

mgr inż. Janusz Jasek

mgr Janusz Salmanowicz

Konsultacja:

dr inż. Zbigniew Kramek

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Katarzyna Maćkowska

Korekta:

mgr Edyta Koziel

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej 311[20].Z1.01 Wykonywanie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej w modułowym programie nauczania dla zawodu technik mechanik.

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2005

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	3
2. Wymagania wstępne	5
3. Cele kształcenia	6
4. Materiał nauczania	7
4.1. Identyfikowanie operacji obróbki cieplnej	7
4.1.1. Materiał nauczania	7
4.1.2. Pytania sprawdzające	11
4.1.3. Ćwiczenia	11
4.1.4. Sprawdzian postępów	12
4.2. Wykonywanie zabiegów obróbki cieplnej	13
4.2.1. Materiał nauczania	13
4.2.2. Pytania sprawdzające	20
4.2.3. Ćwiczenia	21
4.2.4. Sprawdzian postępów	22
4.3. Zabieg obróbki cieplno-chemicznej	23
4.3.1. Materiał nauczania	23
4.3.2. Pytania sprawdzające	28
4.3.3. Ćwiczenia	28
4.3.4. Sprawdzian postępów	28
5. Sprawdzian osiągnięć	29
6. Literatura	32

1. WPROWADZENIE

Poradnik będzie Ci pomocny w przyswajaniu wiedzy o przemianach strukturalnych zachodzących podczas obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, celu stosowania obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, a także ułatwi Ci wykonywanie procesu obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej.

W poradniku zamieszczono:

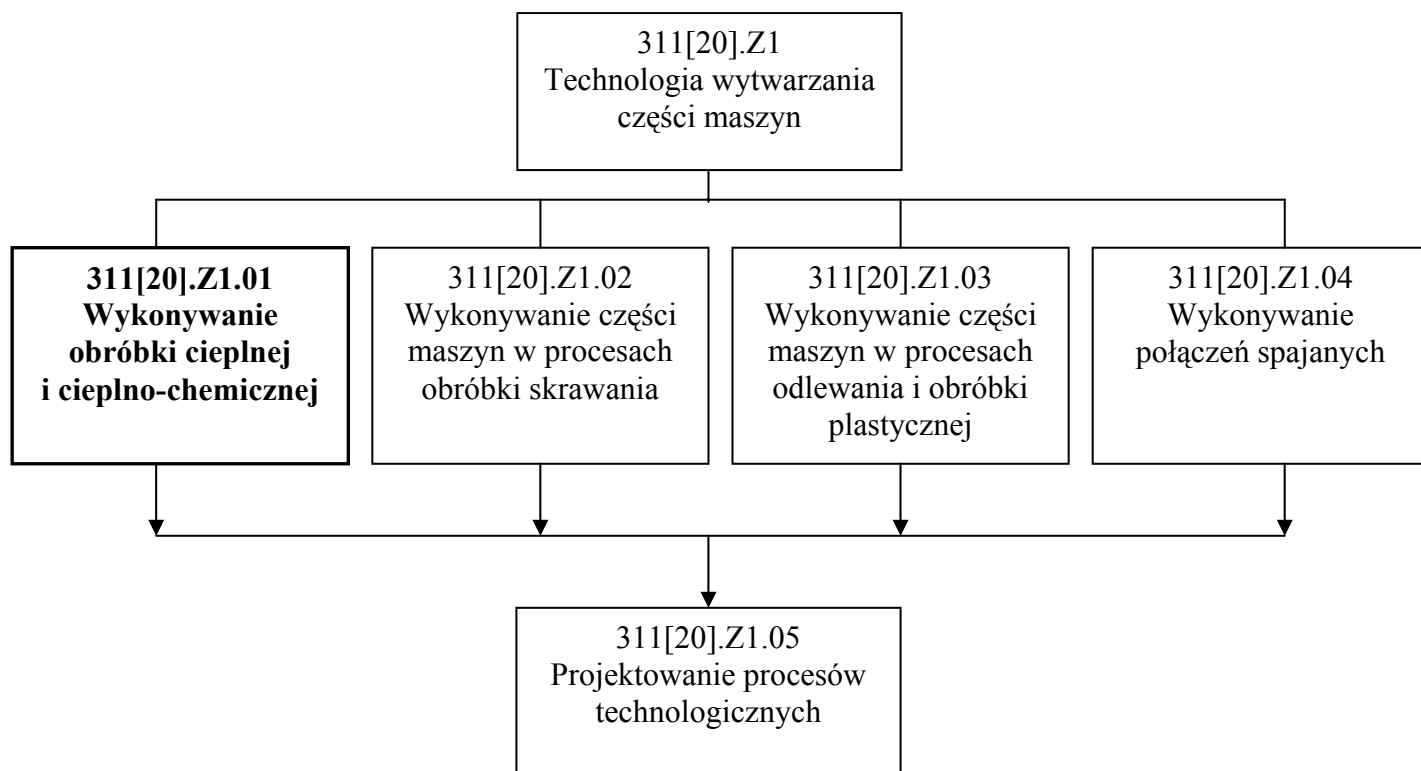
- wymagania wstępne, czyli wykaz niezbędnych umiejętności i wiedzy, które powinieneś mieć opanowane, aby przystąpić do realizacji tej jednostki modułowej,
- cele kształcenia tej jednostki modułowej,
- materiał nauczania (rozdział 4) umożliwiający samodzielne przygotowanie się do wykonania ćwiczeń i zaliczenia sprawdzianów. Wykorzystaj do poszerzenia wiedzy wskazaną literaturę oraz inne źródła informacji. Obejmuje on również ćwiczenia, które zawierają:
 - wykaz materiałów, narzędzi i sprzętu potrzebnych do realizacji ćwiczenia,
 - pytania sprawdzające wiedzę potrzebną do wykonania ćwiczenia,
 - sprawdzian teoretyczny,
 - sprawdzian umiejętności praktycznych,
- przykład zadania/ćwiczenia oraz zestaw pytań sprawdzających Twoje opanowanie wiedzy i umiejętności z zakresu całej jednostki. Zaliczenie tego ćwiczenia jest dowodem osiągnięcia umiejętności praktycznych określonych w tej jednostce modułowej. Wykonując sprawdzian postępów powinieneś odpowiadać na pytanie tak lub nie, co oznacza, że opanowałeś materiał albo nie.

Jeżeli masz trudności ze zrozumieniem tematu lub ćwiczenia, to poproś nauczyciela lub instruktora o wyjaśnienie i ewentualne sprawdzenie, czy dobrze wykonujesz daną czynność. Po przerobieniu materiału spróbuj zaliczyć sprawdzian z zakresu jednostki modułowej.

Jednostka modułowa: Wykonanie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, której treści teraz poznasz jest jednym z modułów koniecznych do zapoznania się z technologią wytwarzania części maszyn – schemat 1.

Bezpieczeństwo i higiena pracy

W czasie pobytu w pracowni musisz przestrzegać regulaminów, przepisów bhp i higieny pracy oraz instrukcji przeciwpożarowych, wynikających z rodzaju wykonywanych prac. Przepisy te poznasz podczas trwania nauki.



Schemat układu jednostek modułowych

2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Przystępując do realizacji programu nauczania jednostki modułowej powinieneś umieć:

- stosować układy SI,
- korzystać z różnych źródeł informacji,
- posługiwać się pojęciami z zakresu materiałoznawstwa oraz metalurgii procesów,
- czytać instrukcję obsługi stanowiska, a także czytać proces technologiczny obróbki cieplnej.

3. CELE KSZTAŁCENIA

W wyniku realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- wyjaśnić cel stosowania obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej,
- sklasyfikować metody obróbki cieplnej,
- posłużyć się wykresem Fe-C przy doborze temperatur różnych rodzajów obróbki cieplnej dla stali niestopowych,
- przewidzieć zmianę właściwości mechanicznych materiału po obróbce cieplnej,
- ustalić cykl obróbki cieplnej,
- ustalić parametry obróbki cieplnej,
- wyjaśnić przemiany strukturalne zachodzące w stalach w czasie nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia,
- rozróżnić urządzenia do nagrzewania,
- sklasyfikować wady występujące przy obróbce cieplnej,
- dobrać obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną przy wykonywaniu prostych części maszyn,
- wykonać wyżarzanie,
- wykonać hartowanie stali niestopowej,
- wykonać ulepszanie cieplne stali konstrukcyjnej niestopowej,
- scharakteryzować nawęglanie, azotowanie, węgloazotowanie i azotonawęglanie,
- wyjaśnić zasady doboru procesu i parametrów obróbki cieplno-chemicznej,
- zaplanować przebieg procesu obróbki cieplno-chemicznej dla typowych narzędzi i części maszyn,
- przeprowadzić wybrany proces obróbki cieplno-chemicznej,
- sprawdzić jakość wykonanej pracy,
- zastosować przepisy bhp, ochrony ppoż. i ochrony środowiska na stanowisku pracy,
- skorzystać z literatury technicznej, norm, poradników.

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Identyfikowanie operacji obróbki cieplnej

4.1.1. Materiał nauczania

Wiadomości ogólne

Obróbka cieplna jest zabiegiem lub połączeniem zabiegów cieplnych, pod wpływem których zmienia się w stanie stałym struktura stopów, a tym samym ich właściwości mechaniczne i fizyczne. Stosowanie zabiegów cieplnych umożliwia w szerokim zakresie zmianę właściwości stopów, a nawet – w niewielkim zakresie – czystych metali.

Przez **zabieg cieplny** rozumiemy cykl zmian temperatury rozpoczynający się i kończący się w temperaturze otoczenia. Składa się on z trzech okresów: **nagrzewania**, **wygrzewania** i **chłodzenia**. Zabiegi cieplne mogą się różnić między sobą szybkością ogrzewania i chłodzenia oraz wysokością temperatury wygrzewania.

Zabiegi stosowane do stali, które niezależnie od wysokości temperatury wygrzewania kończą się powolnym chłodzeniem, nazywamy **wyżarzaniem**.

Zabiegi, które kończą się szybkim chłodzeniem, czyli oziębianiem, nazywamy **hartowaniem**, jeżeli uprzednio skutek ogrzewania występował w stali austenit.

Niekiedy – w przypadku stali niskowęglowych – stosuje się **przesycanie**, którego celem jest poprawa plastyczności stali. Kończy się ono wprowadzając po wygrzaniu szybkim chłodzeniem, lecz zjawiska towarzyszące temu procesowi są inne (nie powstaje, np. podczas **wygrzewania austenit**), a zatem i skutki są odmienne od uzyskanych podczas hartowania.

Przemiany w stali podczas ogrzewania i wygrzewania

Podczas obróbki cieplnej następują w stalach przemiany jako skutek różnych zabiegów. Dokładne poznanie tych przemian jest konieczne do zrozumienia zjawisk zachodzących podczas obróbki cieplnej. W tym celu można posłużyć się częścią wykresu żelazo-węgiel obejmującą stale w zakresie ich przemian w stanie stałym (rys. 1).

Dla uproszczenia linie przemian oznacza się literą A z odpowiednimi indeksami. Przemiany zachodzące podczas ogrzewania oznacza się symbolem A_c , a przemiany zachodzące podczas chłodzenia – symbolem A_f . W celu odróżnienia poszczególnych przemian dodaje się jeszcze przy symbolu literowym indeks cyfrowy, np. A_{c1} , co oznacza pierwszą przemianę zachodzącą podczas ogrzewania.

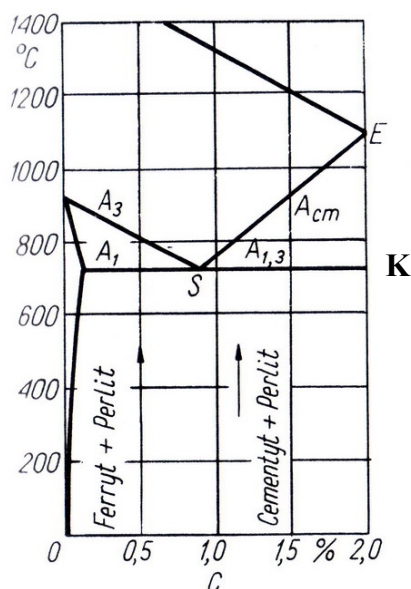
Dla uproszczenia na wykresie przyjmuje się, że przemiany zarówno podczas ogrzewania, jak i chłodzenia zachodzą w tej samej temperaturze i z tego powodu będzie się je oznaczać literą A z cyfrowym indeksem. Tak więc linia w układzie żelazo-cementyt, oznaczana dotychczas literami PS, nazywać się będzie A_1 linia GS – A_3 , linia SK – $A_{1,3}$, a linia SE – A_{cm} .

Podczas ogrzewania stali do temperatury przemiany A_1 , która poprzednio stygła wolno, nie zachodzą w niej niemal żadne zmiany strukturalne. Można tu mówić jedynie o rozpuszczaniu się w ferrycie cementytu trzeciorzędowego.

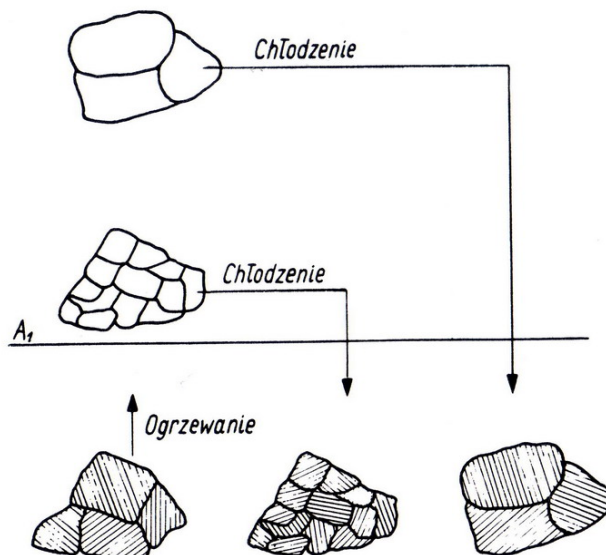
Po nieznacznym przekroczeniu temperatury 723°C perlit występujący w stali ulega powolnej przemianie w austenit. W stalach podyutektoidalnych zawierających, mniej niż 0,8% węgla po zmianie perlitu na austenit o składzie chemicznym odpowiadającym punktowi S pozostaje jeszcze pewna ilość ubożego w węgiel ferrytu. W miarę podwyższania się temperatury ferryt przechodzi do austenitu, rozcieńczając go żelazem. Po tej przemianie

austenit ma skład chemiczny taki sam, jaki miała stal przed tymi przemianami.

Zatem ogrzewanie stali podutektoidalnej do temperatury wyższej niż A_3 prowadzi najpierw do zamiany perlitu w austenit i następnie — do rozpuszczenia się ferrytu w austenicie.



Rys. 1. Przemiany podczas ogrzewania stali



Rys. 2. Schemat przebiegu zmian wielkości ziarn podczas ogrzewania i chłodzenia stali eutektoidalnej

Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

W stalach nadeutektoidalnych, które składają się z perlitu i cementytu, przebieg zmian podczas ogrzewania jest podobny do opisanego. Na początku w temperaturze nieco wyższej od 723°C nastąpi zmiana perlitu w austenit, a dopiero przy dalszym ogrzewaniu rozpuści się w nim cementyt drugorzędowy. W temperaturze wyższej od temperatury przemiany A_{cm} stal nadeutektoidalna będzie miała budowę austenityczną.¹

Opisane przemiany przebiegają bardzo wolno, gdyż wymagają nieraz znacznych przemieszczeń atomów. Z tego powodu, aby zapewnić odpowiednio długi czas na przeprowadzenie zamierzonych przemian w całej masie materiału, stosuje się (po osiągnięciu odpowiedniej temperatury) dodatkowo wygrzewanie, które w zastosowaniu do małych przedmiotów ze zwykłych stali węglowych jest na ogół krótkotrwałe, lecz w odniesieniu do dużych przedmiotów ze stali stopowych należy się liczyć z długotrwałym wygrzewaniem, mającym na celu uzyskanie struktury austenitycznej w całej masie obrabianego przedmiotu.

Wielkość ziarn w znacznej mierze wpływa na właściwości stali i z tego powodu należy znać warunki, w których może nastąpić zmiana ich wielkości. Zazwyczaj staramy się o uzyskanie struktury drobnoziarnistej, gdyż taka zapewnia lepszą wytrzymałość.

Podczas przemiany perlitu w austenit powstają zawsze drobne ziarna (rys. 2). Dalsze ogrzewanie stali powoduje rozrost ziarn. Wzrostowi temperatury towarzyszy szybki rozrost ziarn. Jednak nie we wszystkich stalach tendencje do rozrostu ziarn są jednakowe.

¹ Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

W niektórych stalach zaraz po przekroczeniu temperatury przemiany A_1 ziarna ulegają rozrostowi. Takie stale nazywamy gruboziarnistymi. Inne w szerokim zakresie temperatury nie zmieniają wielkości ziarna i dopiero po przekroczeniu pewnej temperatury, dość odległej od temperatury przemiany A_1 , ulegają spontanicznemu rozrostowi. Takie stale uważa się za drobnoziarniste.

Przemiany w stali podczas chłodzenia

Przemiany przedstawione na wykresie żelazo-węgiel zachodzą podczas bardzo powolnego ogrzewania lub chłodzenia. Stale ogrzane powyżej linii A_3 i A_{cm} (patrz rys. 1) mają budowę austenityczną, stanowią więc roztwór stały węgla w żelazie γ [$Fe_\gamma(C)$].

W praktyce nie zawsze stosuje się powolne chłodzenie. Należy wobec tego zbadać, jak będzie się zachowywał austenit, jeżeli nie pozwolimy na przemiany w warunkach równowagi, lecz stworzymy warunki mniej lub bardziej odległe od takiego stanu. W tym celu będziemy się teraz zajmować przemianami austenitu, którego skład chemiczny odpowiada składowi określonego punktem S. Skład chemiczny dobieramy celowo w taki sposób, aby przemiany austenitu w perlit nie poprzedzało nawet podczas powolnego chłodzenia wydzielanie się ferrytu lub cementytu.

Austenit o składzie eutektoidu (punkt S) podczas powolnego chłodzenia zamienia się w perlit. Wówczas z austenitu wydzieli się cementyt drugorzędowy, a z zubożonego w węgiel austenitu powstaje ferryt. Wydzielenie się cementytu wymaga znacznego przesunięcia atomów i z tego powodu jest procesem dyfuzyjnym przebiegającym stosunkowo wolno. Natomiast przebudowa sieci Fe_α w sieć Fe_γ (przemiana alotropowa) następuje szybko, ponieważ nie zachodzą tu znaczniejsze przemieszczenia atomów.

Proces powstawania perlitu zaczyna się od wydzielenia w obszarach ziarn austenitu zarodków cementytu drugorzędowego. Wydzielenie płytki cementytu pociąga za sobą zubożenie znajdującego się dokoła niej austenitu w węgiel. Tworzy się więc obok płytek cementytu obszar prawie pozbawiony węgla, w którym austenit przemienia się niezwłocznie w ferryt – obok płytek cementytu pojawiają się więc płytki ferrytu.

Wielkość płytek cementytu zależy od stopnia przechłodzenia austenitu. Szybkie chłodzenie prowadzi do uzyskania dużych stopni przechłodzenia, a to jest przyczyną powstania większej liczby zarodków krystalizacji. Przy znacznych stopniach przechłodzenia wydzielający się z austenitu cementyt jest bardzo drobny.

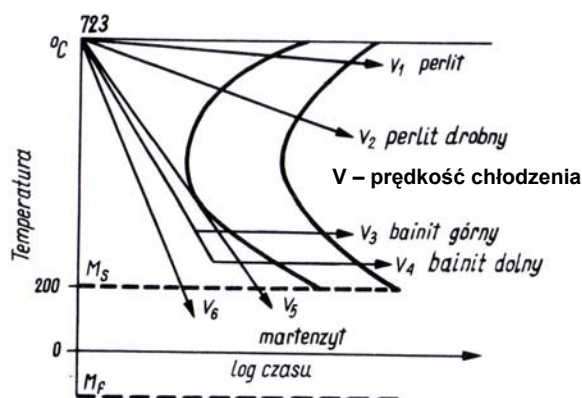
W temperaturze $723^\circ C$ austenit o składzie określonym punktem S nie ulega jeszcze przemianie w perlit. Dopiero nieznaczne obniżenie tej temperatury umożliwia powstanie pierwszych ośrodków krystalizacji nowych faz. Badania wykazują, że po przekroczeniu temperatury przemiany powstawanie i rozrost ośrodków krystalizacji są w pewnym okresie bardzo powolne. Okres bardzo powolnych przemian nazywamy okresem inkubacji. Kończy się on z chwilą, gdy przechłodzony austenit bardzo szybko zacznie ulegać przemianie, która po pewnym czasie się kończy.

Taką przemianę dla różnych stopni przechładzania można wykryć i zarejestrować metodami magnetycznymi, gdyż austenit jest paramagnetyczny, a powstający obok cementytu ferryt wykazuje dobre właściwości magnetyczne.

Informacje o początku i końcu przemiany przechłodzonego austenitu pozwalają zbudować wykres CTP (czas, temperatura, przemiana), z którego można wyciągnąć wnioski o wpływie szybkości chłodzenia na strukturę stali (rys. 3). Typ struktury powstającej podczas przemiany austenitu jest zależny od stopnia jego przechłodzenia. W związku z tym, chłodząc stal z różnymi prędkościami, można otrzymać różne struktury. Różnice polegają w zasadzie tylko na wielkości ziarna cementytu.

Na rysunku 3 przedstawiono różne szybkości chłodzenia powodujące powstawanie typowych struktur stali. Przy małych szybkościach chłodzenia v_1 powstaje struktura złożona

z płytek cementytu i płytek ferrytu, czyli perlit. Przy większych szybkościach v_2 powstaje struktura złożona, podobnie jak poprzednio, z ferrytu i cementytu. Wielkość ziarn cementytu jest nieznaczna, lecz są one jeszcze widoczne pod powiększeniem 600 razy. Taką strukturę nazywamy perlitem drobnym. Przy szybkościach v_3 powstaje struktura zwana bainitem górnym, złożona z ferrytu i cementytu, o ziarnach tak drobnych, że zwykle powiększenie mikroskopu optycznego nie jest w stanie ich ujawnić. Dopiero mikroskop elektronowy pod powiększeniem 10 000 razy pozwala wyodrębnić w tej strukturze dwie zasadnicze fazy, tj. ferryt i cementyt.



Rys. 3. Wykres CTP dla stali o składzie eutekto-idealnym

Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Przemiany zachodzące wskutek chłodzenia z prędkością v_4 przy znacznym przechłodzeniu w temperaturze niższej od temperatury punktu przegięcia krzywej C polegają na tworzeniu się igieł widocznych pod mikroskopem metalograficznym. Badania pod mikroskopem wykazują, że igły składają się z maleńkich płytek ferrytu i cementytu. Jak z tego wynika, i ta struktura składa się z dwóch faz – ferrytu i cementytu. Nazywamy ją bainitem dolnym.

Chłodzenie stali z szybkościami większymi od szybkości v_5 , zwanej krytyczną, prowadzi do powstania struktury jednofazowej, którą nazywamy martenzytem.

Chłodzenie stali z szybkościami równymi lub większymi od szybkości krytycznej powoduje zmianę austenitu w martenzyt w temperaturze niższej od temperatury M_s . Po przekroczeniu temperatury M_s w ziarnach austenitu pojawiają się płytki martenzytu, dzieląc ziarno od brzegu do brzegu. Pojawienie się dalszych płytek martenzytu jest uzależnione od obniżenia temperatury.

W miarę chłodzenia powstają coraz to nowe płytki martenzytu, które układają się w ziarnie austenitu w postaci ośmiościanu. Z tego powodu płytki martenzytu przecięte płaszczyzną szlifu pod mikroskopem wyglądają jak igły przecinające się pod kątami 60° i 120° . Zakończenie przemiany austenitu w martenzyt następuje w temperaturze M_f .

Objętość martenzytu jest większa od objętości austenitu. Powoduje to powstawanie w pozostałym austenicie naprężeń ściskających, które utrudniają dalszą jego przemianę w martenzyt. Wzrost naprężeń ściskających powoduje nawet zatrzymanie dalszej przemiany do chwili obniżenia się temperatury.

W każdej temperaturze poniżej M_s istnieje pewna określona dla danej stali ilość austenitu, który nie może się już przemienić w martenzyt. Taki austenit nazywamy szczątkowym; jego ilość może być zmniejszona do pewnej wartości przez dalsze obniżenie temperatury.

Chłodzenie stali podeutektoidalnej lub nadeutektoidalnej w zakresie mniejszych stopni przechłodzenia powoduje w pierwszym okresie przemiany wydzielanie z austenitu ferrytu lub cementytu i dopiero w dalszym okresie – rozpad austenitu na cementyt i ferryt.

Składniki stopowe wywierają wpływ na położenie i kształt wykresu izotermicznych przemian przechłodzonego austenitu. Ogólnie mówiąc, wszystkie składniki stopowe, z wyjątkiem kobaltu i w pewnych warunkach wanadu, powodują przesunięcie wykresu CTP w prawo, a więc zmniejszają krytyczną szybkość chłodzenia. Wzrost zawartości węgla w stali powoduje przedłużenie okresu inkubacji oraz obniżenie temperatury punktów M_s i M_f .

W stalach o bardzo małej zawartości węgla (np. 0,2% C) szybkość krytyczna chłodzenia potrzebna do otrzymania struktury martenzytycznej jest tak duża, że w praktyce nie można jej uzyskać w warunkach technicznych. Z tego powodu stali o małej zawartości węgla nie poddaje się hartowaniu.

4.1.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co jest istotą obróbki cieplnej?
2. Jakie przemiany zachodzą w stali podczas nagrzewania i wygrzewania?
3. Na czym polega obróbka cieplna stali?
4. Jakie zmiany zachodzą w stali podczas chłodzenia?
5. Jaki ma wpływ na strukturę stali ma szybkość chłodzenia podczas obróbki cieplnej?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wyznaczanie temperatury hartowania dla stali niestopowej o gatunku 45 na podstawie wykresu Fe-C.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) zidentyfikować stal niestopową o gatunku 45,
- 2) zidentyfikować zachodzące przemiany podczas nagrzewania stali i wygrzewania,
- 3) wyznaczyć temperaturę hartowania na podstawie wykresu Fe-C,
- 4) zapisać wyniki przeprowadzonego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- plansza wykresu Fe-C,
- tabela z danymi o stalach,
- literatura zgodna z punktem 6 Poradnika dla ucznia.

4.1.4. Sprawdzian postępów

	Tak	Nie
Czy potrafisz:		
1) wyjaśnić istotę obróbki cieplnej?	☐	☐
2) opisać zmiany strukturalne zachodzące podczas nagrzewania i wygrzewania?	☐	☐
3) wyjaśnić, jakie zachodzą zmiany strukturalne podczas chłodzenia?	☐	☐
4) scharakteryzować zastosowanie obróbki cieplnej w budowie maszyn?	☐	☐
5) określić, jakie materiały można poddawać obróbce cieplnej?	☐	☐

4.2. Wykonywanie zabiegów obróbki cieplnej

4.2.1. Materiał nauczania

Wyżarzanie

Wyżarzanie jest zabiegiem cieplnym polegającym na nagrzaniu stopu do odpowiedniej temperatury, wygrzaniu go w tej temperaturze i chłodzeniu do temperatury otoczenia. Szybkość chłodzenia po wyżarzaniu w temperaturze wyższej od temperatury przemian powinna być niewielka. Szybkie chłodzenie uniemożliwiłoby bowiem powstanie faz zgodnych ze stanem równowagi stopu. Po wyżarzeniu w zakresie temperatury poniżej temperatury przemian szybkość chłodzenia może być dowolna, gdyż nie zachodzą w tym zakresie żadne przemiany fazowe.

W praktyce rozróżnia się następujące rodzaje wyżarzania: ujednorodniające, normalizujące, odprężające, zmiękczące, rekrytalizujące i odprężające.

Wyżarzanie ujednorodniające (homogenizacja)

Wyżarzanie ujednorodniające najczęściej jest stosowane do wlewków ze stali stopowych, które po odlaniu wykazują niejednorodność składu chemicznego powstałą podczas krzepnięcia stali. Wyżarzanie ujednorodniające ma na celu usunięcie przez dyfuzję w stanie stałym segregacji dendrytycznej w obszarach ziarn.

Ujednorodnienie stali osiąga się przez wygrzewanie wlewków w temperaturze $1000\div 1250^{\circ}\text{C}$ w ciągu $12\div 15$ godzin. Po wyżarzaniu ujednorodniającym, które jest wykonywane w hucie, następuje obróbka plastyczna wlewka, polegająca na kuciu lub walcowaniu.

Wyżarzanie normalizujące

Wyżarzanie normalizujące ma na celu otrzymanie równomiernej budowy drobnoziarnistej, która zapewnia lepsze właściwości mechaniczne niż gruboziarnista.

Przebieg procesu normalizowania stali zależy w pewnej mierze od jej składu chemicznego. Stale podutektoidalne ogrzewa się podczas wyżarzania normalizującego do temperatury wyższej o około 50°C od temperatury przemiany A_3 . Następnie wyjęte z pieca przedmioty chłodzi się na powietrzu. Podczas przemiany perlitu w austenit, jak wiemy, następuje rozdrobnienie ziarna.

Stale nadeutektoidalne można wyżarzać w celu znormalizowania w temperaturze wyższej o około 50°C od temperatury określonej linią A_{cm} lub o około 50°C wyższej od temperatury określonej linią A_1 .

Odmianą wyżarzania normalizującego jest wyżarzanie zupełne, które różni się od poprzedniego sposobem chłodzenia. Podczas normalizowania stal jest ogrzewana do temperatury wyższej od temperatury określonej linią GSE oraz chłodzona na wolnym powietrzu. Podczas wyżarzania zupełnego chłodzenie, do takiej samej temperatury jak przy wyżarzaniu normalizującym, odbywa się w piecu bardzo wolno stygnącym. Dzięki temu przemiany fazowe przebiegają w stali zgodnie ze stanem równowagi. W wyniku takiego wyżarzania uzyskuje się dobrą plastyczność stali, małą twardość i dobrą obrabialność.

Wyżarzanie zupełne jest stosowane głównie do stali stopowych, które przy większych szybkościach chłodzenia wykazują skłonność do powstawania struktur twardych, np. martenzytu.

Wyżarzanie zmiękczące

Wyżarzanie zmiękczące stosuje się głównie do tych stali, w których występują duże kryształy cementytu w perlicie oraz siatka cementytu otaczająca pierwotne ziarna austenitu.

Wyżarzanie zmiękczące polega na nagrzaniu stali do temperatury określonej w przybliżeniu przemianą A_1 i następnie studzeniu po długotrwałym (kilkunastogodzinnym) wygrzewaniu.

Niekiedy podczas zmękczenia stosuje się tzw. wygrzewanie wahadłowe stali. Polega ono na ogrzaniu stali do temperatury przekraczającej temperaturę przemiany A_{cl} oraz na studzeniu do temperatury niższej od temperatury przemiany A_{rl} . Taki cykl zmian temperatury powtarza się kilkakrotnie.

Wygrzewanie wahadłowe w temperaturze punktu A_1 wywołuje rozdrobnienie cementytu. Podczas ogrzewania do temperatury przekraczającej temperaturę przemiany A_1 w stalach nadeutektoidalnych następuje przemiana perlitu w austenit i w miarę wzrostu temperatury – powolne rozpuszczanie się cementytu w austenicie. Ponieważ siatka cementytu rozpuszcza się w austenicie równomiernie, przy niecałkowitym rozpuszczeniu się cementytu siatka zostanie poprzerrywana. Dalsze, powtarzane cykle chłodzenia wahadłowego będą sprzyjać powstawaniu struktury ziarnistej cementytu na tle ferrytycznym. Zabiegi cieplne zmierzające do uzyskania cementytu kulkowego na tle ferrytycznym nazywamy niekiedy sferoidyzacją.

Wyżarzanie odprężające

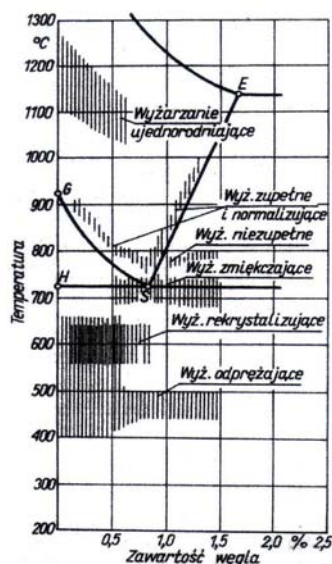
Wyżarzanie odprężające stosuje się w celu usunięcia lub zmniejszenia naprężeń własnych powstałych w materiale wskutek zgrubnej obróbki skrawaniem, odlewania, spawania lub obróbki plastycznej odbywającej się w temperaturze niższej od temperatury rekrytalizacji tj. na zimno.

Wyżarzanie wykonywane w celu usunięcia naprężeń własnych stosowane najczęściej do stali, należy prowadzić w temperaturze nie przekraczającej temperatury przemiany A_1 (zazwyczaj $550 \pm 650^\circ$).

Usunięcie naprężeń zależy od czasu i temperatury zabiegu. Im wyższa jest temperatura, tym krótszy może być czas trwania procesu wyżarzania.

Hartowanie

Hartowanie jest zabiegiem cieplnym polegającym na nagrzaniu stali do temperatury wyższej o około 30°C od temperatury przemiany A_3 (linia GSK), wygrzaniu jej w tej temperaturze i oziębieniu z szybkością zwykle większą od szybkości krytycznej (rys. 4).



Rys. 4. Zakres temperatury nagrzewania stali podczas hartowania

Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

W temperaturze wyższej niż określona linią GSK struktura stali podeutektoidalnej będzie się składać z kryształków austenitu, a struktura stali nadeutektoidalnej – z austenitu i cementytu drugorzędowego. Szybkie oziębienie z prędkością większą od krytycznej prowadzi do zmiany austenitu w martenzyt.

W stalach podeutektoidalnych składnikiem strukturalnym stali zahartowanej będzie martenzyt, a stali nadeutektoidalnej – martenzyt i cementyt drugorzędowy. Obok martenzytu pojawia się jeszcze austenit szczątkowy, którego znaczne ilości ujawnia się w stalach zawierających duże ilości składników stopowych.

Hartowanie prowadzone z zakresu austenitu nazywamy **hartowaniem zupełnym** w odróżnieniu od **hartowania niezupełnego**, które następuje wówczas, gdy obok austenitu w temperaturze wygrzewania stali przed hartowaniem istnieje jeszcze jakaś faza, np. cementyt. W praktyce w celu uzyskania właściwych szybkości chłodzenia do oziębiania stali podczas hartowania stosuje się głównie wodę, oleje lub sprężone powietrze. Spośród wymienionych środków chłodzących najszybciej chłodzi woda, najwolniej – strumień sprężonego powietrza.

Intensywnych środków chłodzących używa się do stali, które mają dużą krytyczną szybkość chłodzenia, tj. do stali niestopowych. Stale stopowe z dodatkiem chromu, wolframu i innych, chłodzi się zazwyczaj w oleju. Stale o bardzo dużej zawartości chromu i wolframu można chłodzić w strumieniu sprężonego powietrza.

Szybkość chłodzenia w hartowanym przedmiocie jest maleje w kierunku jego wnętrza. Przedstawiając na wykresie przemian przechłodzonego austenitu różne szybkości chłodzenia, można wyciągnąć wniosek, że w martenzyt może się zmienić tylko austenit chłodzony z szybkością równą lub większą od krytycznej. Tam, gdzie szybkość chłodzenia jest mniejsza od krytycznej, powstaną struktury, w których martenzyt będzie występować obok bainitu lub nawet perlitu drobnego.

Zdolność do hartowania się stali w głąb nazywamy hartownością. Niektóre stale hartują się na znaczną głębokość, inne nie wykazują takiej właściwości. Stale dające po hartowaniu grubą warstwę zahartowaną nazywamy stalami głęboko hartującymi się. Stale, w których po hartowaniu powstaje cienka warstwa zahartowana, noszą nazwę płytko hartujących się. W praktyce przyjęto uważać za zahartowaną warstwę, w której martenzyt występuje przynajmniej w 50%.

Hartowanie powierzchniowe polega na nagrzewaniu materiału do właściwej temperatury tylko na jego powierzchni. Rdzeń materiału nie jest nagrzewany, zatem podczas obróbki nie zmienia swych właściwości. Celem takiego hartowania jest uzyskanie twardej powierzchni, pracującej zwykle na ścieranie, przy zachowaniu ciągliwego rdzenia.

Zależnie od sposobu nagrzewania rozróżnia się hartowanie powierzchniowe: płomieniowe, indukcyjne i kąpielowe.

Odpuszczanie

Do przedmiotów ze stali, które były uprzednio poddane hartowaniu, stosuje się jeszcze dalszą obróbkę cieplną. Polega ona na nagrzaniu hartowanej stali do temperatury niższej od temperatury przemiany A_1 wygrzaniu w tej temperaturze i chłodzeniu najczęściej na powietrzu, niekiedy w oleju.

Zasadniczym celem wyżarzania odpuszczającego (odpuszczania) jest zmniejszenie naprężeń w stali hartowanej i następnie zmniejszenie jej kruchości i twardości oraz zwiększenie właściwości plastycznych i sprężystych. Podczas ogrzewania zahartowanej stali zachodzą w niej zmiany polegające na powstawaniu nowych faz.

Ogrzewanie stali do temperatury około 250°C (odpuszczanie niskie) powoduje usunięcie naprężeń hartowniczych oraz przemianę znacznej części austenitu szczątkowego w

martenzyt. Przemiana austenitu szczątkowego w martenzyt powoduje w pewnej mierze wzrost twardości stali.

Ogrzewanie do temperatury $400\div 680^{\circ}\text{C}$ jest przyczyną wydzielania się z martenzytu bardzo drobnych ziarn cementytu. Zubożony w węgiel martenzyt staje się ferrytem. W taki sposób powstaje struktura złożona z bardzo drobnych ziarn cementytu rozmieszczonych w ferrycie, zwana bainitem odpuszczania.

Ogrzewanie powyżej 680°C powoduje łączenie się drobnych ziarn cementytu w większe. Powstaje wówczas struktura zwana cementytem kulkowym.

Biorąc pod uwagę zjawiska zachodzące podczas ogrzewania stali zahartowanej, rozróżniamy trzy rodzaje wyżarzania odpuszczającego:

niskie – do 300°C , średnie – $300\div 500^{\circ}\text{C}$ i wysokie – od 500°C do punktu A_{c1} .

Hartowanie połączone z wysokim odpuszczaniem nazywamy ulepszaniem cieplnym. Stale ulepszone cieplnie mimo lepszych właściwości wytrzymałościowych dają się obrabiać skrawaniem.

Przesycanie i starzenie stali

Przesycanie można stosować do stopów wykazujących zmniejszający się wraz z temperaturą zakres istnienia roztworów stałych. Polega ono na nagrzaniu stopu do temperatury, w której rozpuszczalność w stanie stałym jest dostatecznie duża i umożliwia otrzymanie stopu jednofazowego. Szybkie chłodzenie od tej temperatury umożliwia zatrzymanie składnika stopowego w roztworze stałym. Roztwór stały, w którym znajduje się więcej składnika rozpuszczonego niż to z warunków równowagi wynika, nazywa się roztworem przesyconym.

W stalach o małej zawartości węgla podczas powolnego chłodzenia wydziela się na granicy ziarn ferrytu cementyt trzeciorzędowy. Szybkie chłodzenie takiej stali od temperatury około 700°C uniemożliwia wydzielanie się cementytu trzeciorzędowego. Z tego powodu ferryt w temperaturze otoczenia będzie roztworem przesyconym.

Przesycenie stali niskowęglowych w praktyce stosuje się do blach przeznaczonych do głębokiego tłoczenia, gdyż powoduje ono poprawę właściwości plastycznych. Usunięcie kruchego cementytu z granic ziarna ułatwia późniejszą obróbkę plastyczną.

Przesycanie stosuje się również i do innych stopów, np. przesycą się stale stopowe kwasoodporne w celu uzyskania struktury jednofazowej austenitycznej, bardziej odpornej na korozję niż struktura dwufazowa.

Przesycony stop po pewnym czasie ma tendencję do powrotu do stanu równowagi. Wówczas zmieniają się jego właściwości fizyczne i chemiczne. Jest to spowodowane wydzielaniem się z roztworu bardzo rozdrobnionej fazy przesycającej (w stalach-cementytu). Zjawisko to nazywa się starzeniem naturalnym. Można je przyspieszyć przez podwyższenie temperatury. Takie starzenie nazywa się sztucznym. Przesycanie i starzenie stosowane kolejno nazywa się utwardzaniem dyspersyjnym, gdyż powoduje wzrost twardości i wytrzymałości stopu.

Wady obróbki cieplnej.

Do najczęściej spotykanych wad przedmiotów obrobionych cieplnie można zaliczyć:

- miękkie plamy, stanowiące na powierzchni przedmiotu miejsca o znacznie obniżonej twardości;
- odwęglanie, polegające na zmniejszeniu zawartości węgla w przypowierzchniowej warstwie przedmiotu, powodowanym chemicznym działaniem ośrodka;
- przegrzanie, którego skutkiem jest nadmierny rozrost ziarn materiału przedmiotu, powodowany zbyt wysoką temperaturą lub zbyt długim czasem grzania;

- przepalanie, przejawiające się znacznym przegrzaniem oraz nieodwracalnymi zmianami na granicach ziarn;
- przewęglanie, polegające na nadmiernym nasyceniu węglem warstwy przypowierzchniowej przedmiotu;
- utlenianie wewnętrzne, polegające na u-tlenianiu się warstwy przypowierzchniowej przedmiotu wzdłuż granic ziarn.

Urządzenia do obróbki cieplnej

Urządzenia do obróbki cieplnej można podzielić na trzy zasadnicze grupy, a mianowicie:

- *urządzenia podstawowe*, umożliwiające wykonywanie podstawowych zabiegów obróbki cieplnej, tzn. grzania i chłodzenia; należą do nich:
 - piece,
 - nagrzewnice, stosowane do nagrzewania przedmiotów podczas hartowania powierzchniowego,
 - urządzenia wytwarzające atmosfery regulowane,
 - urządzenia do chłodzenia przedmiotów;
- *urządzenia pomocnicze*, umożliwiające wykonywanie czynności pomocniczych, takich jak czyszczenie, mycie i transport przedmiotów;
- *agregaty do obróbki cieplnej*, składające się z połączonych ze sobą urządzeń podstawowych oraz pomocniczych, które są przeznaczone do wykonywania określonej operacji obróbki cieplnej.

Spośród urządzeń podstawowych najważniejszą rolę odgrywają piece i urządzenia do chłodzenia przedmiotów.

W zależności od źródła ciepła piece do obróbki cieplnej można podzielić na elektryczne i paliwowe.

W **piecach elektrycznych** wymagana temperatura jest uzyskiwana najczęściej na skutek przepływu prądu elektrycznego przez kąpiel solną, w której są zanurzone elektrody (piece elektrodowe) lub specjalne elementy grzejne, wbudowane w piec (piece oporowe).

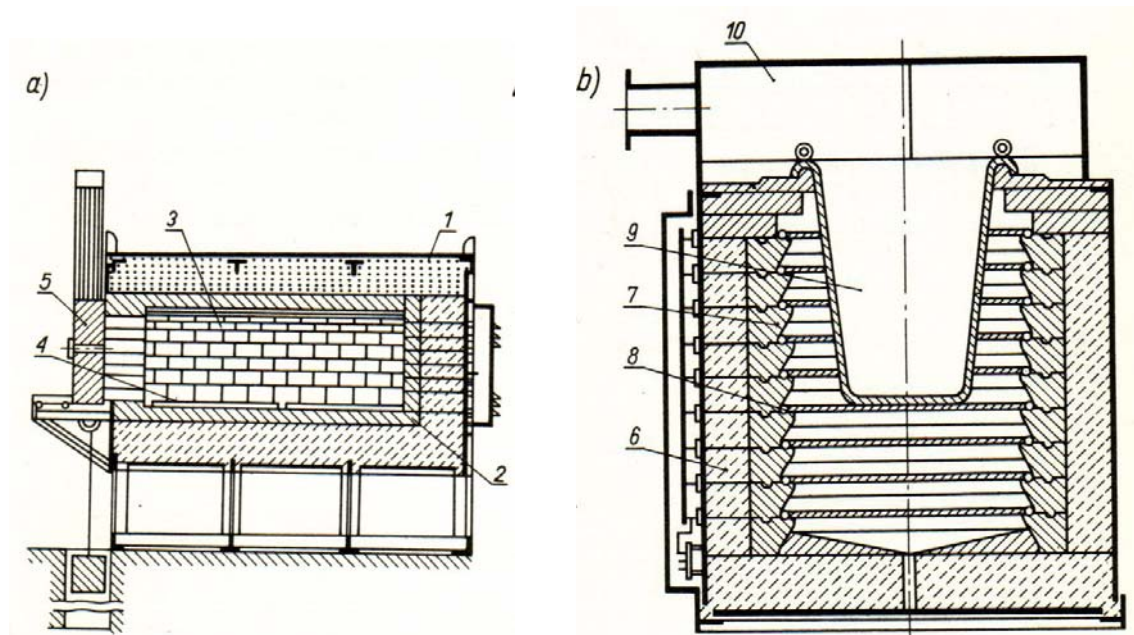
W **piecach paliwowych** wymagana temperatura może być uzyskiwana przez spalanie gazu (piece gazowe) lub olejów (piece olejowe).

Piece elektrodowe, gazowe i olejowe mogą być budowane jako:

- *piece niskotemperaturowe*, w których przedmioty są nagrzewane do temperatury nie przekraczającej 700°C;
- *piece średnotemperaturowe*, w których przedmioty są nagrzewane do temperatury nie przekraczającej 1000°C;
- *piece wysokotemperaturowe*, które umożliwiają nagrzewanie przedmiotów do temperatury powyżej 1000°C.

Piece oporowe, gazowe i olejowe mogą być okresowego lub ciągłego działania, natomiast piece elektrodowe są okresowego działania. Piece okresowego działania pracują w następującym cyklu: ładowanie obrabianych przedmiotów, nagrzewanie i wygrzewanie, wyładowywanie przedmiotów po grzaniu. W piecach ciągłego działania obrabiane przedmioty są ładowane i wyładowywane w sposób ciągły lub skokowy (w regularnych odstępach czasu, stanowiących takt technologiczny). W piecach ciągłego działania załadowywanie i wyładowywanie przedmiotów odbywa się przez dwa odrębne otwory.

Istnieje ponad dziesięć odmian konstrukcyjnych pieców okresowego działania. Najczęściej są stosowane piece komorowe (rys. 5a) i tyglowe (rys. 5b).



Rys. 5. Piece elektryczne do obróbki cieplnej: *a)* komorowy, *b)* tyglowy

1 - obudowa, 2 - obmurowanie (cegłą szamotową) komory grzejnej, 3 - elementy grzejne, 4 - stalowy trzon pieca (podłoga komory grzejnej), 5 - drzwi podnoszone, 6 - obudowa, 7 - obmurowanie, 8 - elementy grzejne, 9 - tygiel z kąpielą solną, 10 - wyciąg gazów

Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części i maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Również piece do pracy ciągłej mają kilkanaście odmian konstrukcyjnych. Schemat pieca taśmowego przedstawiono na rys. 6.

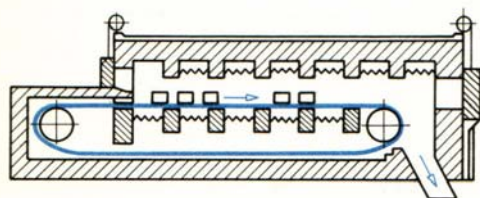
Do urządzeń chłodzących zalicza się: wanny hartownicze, prasy hartownicze, studzienki i komory studzenia.

Wanny hartownicze (rys. 7) to metalowe zbiorniki ze środkiem chłodzącym. Mają zazwyczaj wbudowany płaszcz wodny lub wę-żownicę, co zapobiega zbyt silnemu nagrzewaniu się środka chłodzącego. Są najczęściej stosowanymi urządzeniami do chłodzenia przedmiotów obrabianych cieplnie.

Podczas chłodzenia w **prasach hartowniczych** przedmiot jest zamocowany między dwiema matrycami, co zapobiega jego odkształceniu.

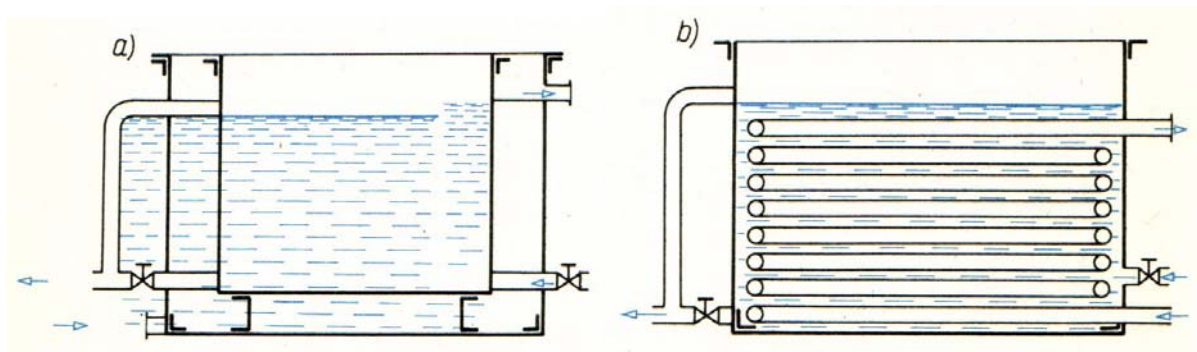
Studzienki są przeznaczone do wolnego chłodzenia — studzenia; ściany komory chłodzącej, wypełnionej powietrzem lub atmosferą ochronną, są chłodzone w sposób naturalny (powietrzem atmosferycznym) lub wymuszony (np. wodą).

Komory studzenia umożliwiają chłodzenie z regulowaną szybkością obniżania temperatury przedmiotów. Ich konstrukcja jest zbliżona do konstrukcji studzienek.



Rys. 6. Schemat pieca taśmowego (do pracy ciągłej)

Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części i maszyn. WSiP, Warszawa 1995



Rys. 7. Wanny hartownicze: a) z płaszczem wodnym, b) z węzownicą
 Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części i maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Bezpieczeństwo i higiena pracy podczas obróbki cieplnej.

Na stanowiskach obróbki cieplnej istnieje wiele możliwości spowodowania nieszczęśliwych wypadków ze względu na specjalny charakter pracy. Do częstych wypadków należą poparzenia płomieniem, rozpryskującą się gorącą solą lub metalem, kontuzje spowodowane upadkiem ciężkich, często nagrzanymi przedmiotów, poparzenia kwasami, skaleczenia twarzy lub rąk w czasie oczyszczania przedmiotów itp.

Przyczyną poparzenia płomieniem jest najczęściej nieprawidłowe rozpalanie pieców, a także mogą nią być wady urządzenia.

Przy paliwie płynnym na skutek nieprawidłowego uruchomienia palnika płomień może się wydostać z pieca na znaczną odległość. Poparzenia rozpryskującą się solą lub metalem mogą być spowodowane zanurzeniem w kąpeli wilgotnych przedmiotów. Poparzenie wskutek zetknięcia się z nagrzanym przedmiotem lub gorącą częścią urządzenia bywa zwykle wynikiem nieostrożności albo nieprawidłowego załadowywania lub rozładowywania pieca.

Często również poparzenie może nastąpić w czasie rozładowywania gorących skrzynek po nawęglaniu. Wypadki w czasie obsługi pieców mogą być spowodowane ciasnotą pomieszczenia, złą organizacją miejsca pracy lub wadliwym działaniem urządzeń i przyrządów pomocniczych.

W czasie transportu przedmiotów mogą się również zdarzyć nieszczęśliwe wypadki na skutek upadku przenoszonych przedmiotów, zaczepienia nimi o ustawione przypadkowo na drodze przedmioty itp.

Przy oczyszczaniu przedmiotów przez piaskowanie mogą nastąpić uszkodzenia oczu odpryskującymi cząstkami piasku lub metalu.

Zależnie od konstrukcji urządzeń, sposobu ich pracy oraz rozmieszczenia w budynkach mogą się zdarzyć nieszczęśliwe wypadki, wywołane wymienionymi już powodami. Dla uniknięcia tych wypadków należy przy organizowaniu zakładu przestrzegać ogólnych przepisów dotyczących higieny i bezpieczeństwa pracy.

W zakres tych przepisów wchodzi nie tylko te, które dotyczą ochrony przed gwałtownym powstaniem uszkodzeń ciała, ale również i takie, które mają na celu zabezpieczenie pracowników przed długotrwałym szkodliwym wpływem warunków pracy, w- wydziale. Wymienić tu przykładowo można złe oświetlenie, złe przewietrzanie, brak ochrony wzroku przed jaskrawymi źródłami światła itp.

Jednym z ważniejszych wymagań higieny i bezpieczeństwa pracy jest przewietrzanie hal warsztatowych.

W halach obróbki cieplnej powinna działać wentylacja naturalna z wykorzystaniem ciągu kominowego i wentylacja mechaniczna usuwająca zużyte powietrze, gazy, dymy, przy pomocy wentylatorów.

Gazy i dymy z nad pieców i wanien powinny być usuwane za pomocą okapów połączonych z systemem wentylacyjnym. System wentylacyjny składa się z rur o odpowiedniej średnicy oraz z urządzenia wyciągowego, tj. wentylatora, komina lub innego urządzenia wyciągowego.

W celu zabezpieczenia pracowników obsługujących piec przed promieniowaniem ciepła ze ścianek pieców i okien stosuje się różnego rodzaju izolacje cieplne.

Ścianki pieca po ich zewnętrznej stronie wykłada się np. pianobetonem, watą szklaną itp. Okna pieców w pewnych przypadkach ekranuje się ponadto za pomocą systemu rur, w których w czasie pracy pieca przepływa woda chłodząca.

Ekran wodny mogą mieć również inną konstrukcję, np. płaszcza okrywającego piec, i bywają stosowane tam, gdzie zwykle materiały izolacyjne nie wystarczają lub gdzie specjalnie zależy na utrzymaniu niskiej temperatury powierzchni pieca. Ponadto w pewnych przypadkach należy stosować indywidualne osłony dla pracowników w postaci fartuchów lub rękawic, wykonanych z tkanin azbestowych lub skórzanych.

Ustawienie pieców w stosunku do wanien hartowniczych uzależnione jest od wielkości pieców oraz specjalnych warunków procesu technologicznego. W zasadzie przy piecach o powierzchni spodu wynoszącej do 1 m² należy ustawiać wanny w odległości nie mniejszej niż 1 m. Jeżeli powierzchnia pieca wynosi do 3 m², odległość ta powinna wynosić około 3 metrów. W pewnych jednak przypadkach wanny muszą być ustawione w takich odległościach, jakich wymagają warunki procesu technologicznego, np. przy hartowaniu bardzo małych przedmiotów odległość pieca od wanny powinna być jak najmniejsza.

W związku z rozstawieniem urządzeń pozostaje szerokość przejść i przejazdów. Szerokość przejść i przejazdów uzależniona jest od wielkości i liczby wyrobów przemieszczanych w wydziale. Zwykle projektuje się przejścia boczne szerokości 1,5 ÷ 2,5 m, a przejścia główne, zależnie od istotnych potrzeb, szerokości około 3 m. Prócz przepisów o charakterze ogólnym w wydziałach obróbki cieplnej obowiązują szczegółowe przepisy o bezpieczeństwie i higienie pracy przy określonych urządzeniach używanych w procesach obróbki cieplnej. Informują one o sposobie bezpiecznej pracy przy piecach elektrycznych różnych typów, przy wannach hartowniczych, przy urządzeniach do nawęglania, cyjanowania itp.

Przed przystąpieniem do pracy przy tych urządzeniach należy zapoznać się dokładnie z tymi przepisami oraz ściśle się do nich stosować.

4.2.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Na czym polega wyżarzanie?
2. Jak rozróżniamy odmiany wyżarzania?
3. Na czym polega hartowanie stali?
4. Na czym polega odpuszczanie?
5. Na czym polega przesycanie i starzenie stali?
6. Zidentyfikuj przepisy bhp podczas zabiegów obróbki cieplnej.

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Dobór parametrów wyżarzania dla gatunków stali 45, 40H, 18G2A.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) dobrać czas wyżarzania do określonej stali na podstawie dostępnej literatury,
- 2) ustalić temperaturę wyżarzania dla określonej stali na podstawie dostępnej literatury i wielkości przedmiotu.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- karta ćwiczeń,
- literatura wymieniona w punkcie 6 poradnika dla ucznia.

Ćwiczenie 2

Przeprowadzenie hartowania przedmiotu z ogrzewaniem na wskroś – materiał stal gatunek 45 i sprawdzenie jakości wykonania.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) dobrać parametry hartowania,
- 2) przeprowadzić proces hartowania przedmiotu w piecu do obróbki cieplnej,
- 3) sprawdzić jakość wykonanego hartowania (szczególnie pęknięcia), a następnie sprawdzić twardość wykonanego zahartowanego elementu,
- 4) przeprowadzić proces odpuszczania celem zmniejszenia twardości i kruchości,
- 5) sprawdzić twardość elementu po wykonaniu procesu obróbki cieplnej,
- 6) stosować przepisy bhp podczas procesu obróbki cieplnej.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko dydaktyczne z piecem do obróbki cieplnej,
- tablice materiałowe,
- stanowisko do badania twardości,
- filmy dydaktyczne, foliogramy itp.,
- literatura wymieniona w punkcie 6 „Poradnika dla ucznia”.

4.2.4. Sprawdzian postępów

	Tak	Nie
Czy potrafisz:		
1) wyjaśnić, na czym polega wyżarzanie?	☐	☐
2) wyjaśnić, na czym polega hartowanie?	☐	☐
3) wyjaśnić, na czym polega odpuszczania?	☐	☐
4) przeprowadzić proces wyżarzania?	☐	☐
5) przeprowadzić proces hartowania?	☐	☐
6) przeprowadzić proces odpuszczania?	☐	☐
7) określić przy pomocy przyrządów pomiarowych twardość elementów po obróbce cieplnej?	☐	☐

4.3. Zabieg obróbki cieplno-chemicznej

4.3.1. Materiał nauczania

Podstawy obróbki cieplnochemicznej stali

Obróbką cieplnochemiczną nazywa się zabiegi cieplne powodujące zmianę składu chemicznego zewnętrznych warstw metalu, osiągane wskutek oddziaływania aktywnego środowiska chemicznego na jego powierzchnię.

Podstawą procesów zachodzących podczas obróbki cieplnochemicznej jest zjawisko dyfuzji. Polega ono na ruchu atomów, jonów lub cząsteczek spowodowanym różnicą stężenia i prowadzącym do wyrównania stężeń wewnętrznych faz. Dyfuzja występująca w gazach i cieczach przebiega szybko, gdyż atomy, jony lub cząsteczki nie napotykają większych oporów na swej drodze.

W ciałach stałych ruch atomów, jonów lub cząstek jest utrudniony ze względu na krystaliczną budowę tych ciał. Dyfuzja polega w nich na względnych przesunięciach atomów lub cząsteczek wewnątrz sieci krystalicznej.

Wędrówka atomów, jonów lub cząsteczek może się odbywać przez bezpośrednią zamianę miejsc w sieci krystalicznej, dyfuzję międzywęzłową lub dyfuzję za pośrednictwem defektów sieci krystalicznej.

Zjawisko dyfuzji jest wykorzystywane do zmiany składu chemicznego zewnętrznych warstw stali w celu zmiany jej właściwości, głównie poprawy twardości, wytrzymałości na ścieranie oraz odporności na korozyjne działanie środowiska.

W celach technicznych do stali są dodawane węgiel, azot, aluminium, krzem, chrom, itd. W praktyce stosuje się głównie nawęglanie, azotowanie, cyjanowanie.

Nawęglanie

Nawęglanie polega na wprowadzeniu węgla do warstw powierzchniowych stali.

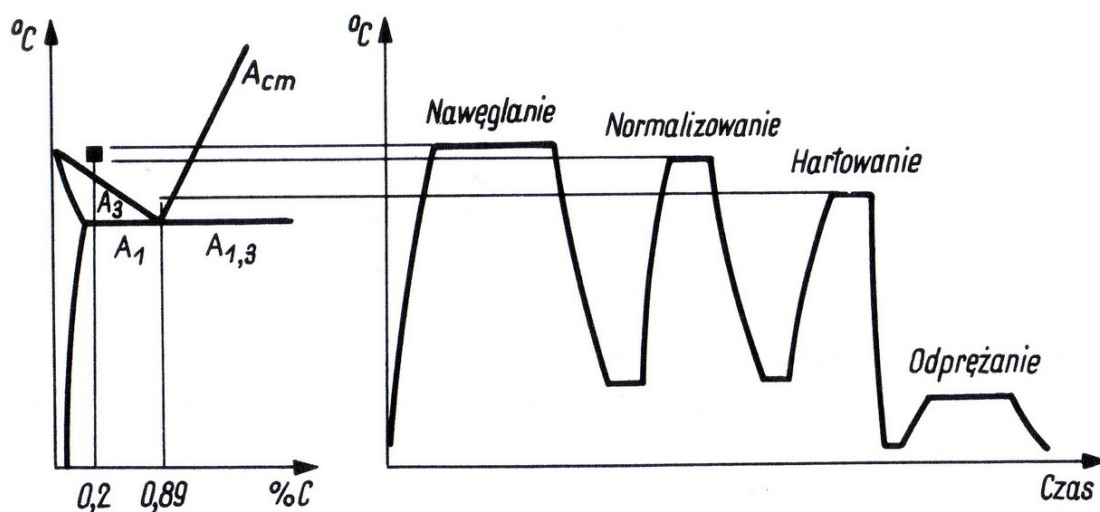
Atomy węgla wprowadzone dyfuzyjnie do stali zajmują w strukturalnych sieciach miejsce między węzłami utworzonymi z atomów żelaza. Sieć żelaza α ma bardzo małe możliwości pomieszczenia w swoim obszarze atomów węgla, lecz sieć żelaza γ , o większych parametrach i innym rozłożeniu atomów żelaza, jest w stanie przyjąć ich pewną liczbę. Z tego powodu stal nawęglaną nagrzewa się do temperatury, w której istnieje żelazo γ , czyli powyżej temperatury przemiany A_3 . Zbytnie podwyższenie temperatury podczas nawęglania nie jest wskazane, gdyż powoduje rozrost ziarna i zwiększenie zawartości węgla w warstwie powierzchniowej powyżej technicznie uzasadnionej wartości.²

Nawęglaniu poddaje się stale o małej zawartości węgla, tj. nie przekraczającej 0,25% C, niekiedy – z niewielkim dodatkiem chromu, manganu lub molibdenu.

Środowisko służące do nawęglania nazywa się karboryzatorem. Rozróżniamy środowiska do nawęglania stałe, ciekłe i gazowe.

Czas nawęglania stali zależy od aktywności środowiska, temperatury i założonej grubości warstwy nawęglanej. Zwykle nawęglą się stale do grubości warstwy 0,5÷2,5 mm. Nawęgloną powierzchniowo stal poddaje się następnie obróbce cieplnej.

² Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995



Rys. 5. Schemat procesu nawęglania i następującej po nawęglaniu obróbki cieplnej

Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

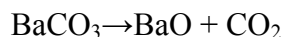
Ponieważ podczas nawęglania stal przebywa dłuższy czas w podwyższonej temperaturze (rys. 5), jej ziarno rozrasta się. W celu zmniejszenia wielkości ziarna stal po nawęglaniu należy normalizować, dobierając temperaturę normalizowania wg składu chemicznego nie zmienionego pod tym względem rdzenia.

Po normalizowaniu stosuje się hartowanie w temperaturze zależnej od składu chemicznego warstwy nawęglonej. Zwykle warstwa zewnętrzna po nawęglaniu ma budowę eutektoidalną lub nadeutektoidalną, a zatem temperatura hartowania powinna wynosić około 750°C. Po nagraniu stal nawęgloną chłodzi się w wodzie lub w oleju.

Po hartowaniu stosuje się odpuszczanie w temperaturze około 180°C, mające na celu odprężenie stali (rys. 5).

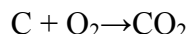
Nawęglanie w środowiskach stałych

Najstarszą metodą nawęglania jest nawęglanie w środowiskach stałych. Podstawowym składnikiem karboryzatora stałego jest węgiel drzewny. Do niego dodaje się pewną ilość węglanów, jak np. węglanu baru BaCO_3 lub węglan sodu Na_2CO_3 . W podwyższonej temperaturze procesu węglany ulegają rozpadowi wg reakcji:



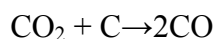
Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Część węgla drzewnego ulega spaleniu na dwutlenek węgla, dzięki tlenowi zawartemu w środowisku, wg reakcji:



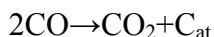
Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Wytworzony w tych warunkach dwutlenek węgla reaguje następnie z węglem wg reakcji:



Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Żelazo działa na tlenek węgla, który ulega rozkładowi:



Źródło: Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995

Powstający podczas tej reakcji węgiel atomowy jest w chwili tworzenia się („in statu nascendi”) bardzo aktywny i szybko dyfunduje do austenitu. W wyniku długotrwałego nawęglania otrzymuje się w stali warstwę nadeutektoidalną, eutektoidalną i podeutektoidalną.

Warstwa nadeutektoidalną nie jest pożądana ze względu na zawarty w niej cementyt drugorzędowy, który najczęściej przybiera postać siatki lub igieł. Taka postać cementytu powoduje niekiedy pękanie i łuszczenie się warstwy nawęglonej. Lepiej, jeżeli cementyt w warstwie nawęglonej przybiera postać ziarnistą.

Warstwa eutektoidalną powinna stanowić główną część warstwy nawęglonej.

Warstwa podeutektoidalną ma za zadanie powiązanie warstwy nawęglowej z rdzeniem. Dlatego warstwa podeutektoidalną powinna się rozciągać na pewnej przestrzeni. Zbyt gwałtowne przejście od warstwy nawęglonej do rdzenia nie jest pożądane, gdyż powoduje odłupywanie się warstwy zahartowanej podczas późniejszej pracy.

Zasadniczo podczas nawęglania powstają w stali warstwy: nadeutektoidalną, eutektoidalną i podeutektoidalną. Jednakże pomiar grubości tak zbudowanej warstwy nawęglonej jest trudny ze względu na stopniowe zmniejszanie się zawartości węgla w warstwie podeutektoidalnej. W praktyce za nawęglone uważa się warstwy: nadeutektoidalną i eutektoidalną; stanowią one techniczną warstwę nawęgloną.

Nawęglanie w środowiskach ciekłych

Nawęglanie w środowiskach ciekłych odbywa się w piecach wannowych, w których znajdują się roztopione sole nawęglające. Podczas nagrzewania zachodzą między składnikami soli reakcje, w których wyniku powstaje węgiel atomowy. Dyfunduje on do austenitu, podobnie jak w środowisku stałym.

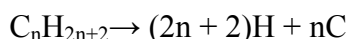
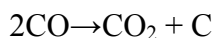
Nawęglanie w środowisku ciekłym ma w porównaniu z nawęglaniem w środowisku stałym wiele zalet, z których najważniejsze należy wymienić:

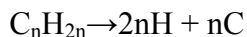
- uproszczenie czynności przygotowanych do procesu nawęglania,
- szybkie i równomierne nagrzewanie stali,
- łatwość regulowania temperatury,
- zmniejszenie odkształceń powodowanych nierównomiernością ogrzewania,
- uzyskiwanie czystych powierzchni po nawęgleniu,
- mniejszy rozrost ziarn ze względu na krótszy czas trwania procesu.

Po nawęgleniu, które trwa zwykle około 1 godziny, w temperaturze 890÷930°C przedmioty nawęglone poddaje się normalizowaniu, hartowaniu i odpuszczaniu niskiemu.

Nawęglanie w środowiskach gazowych

Nawęglanie w gazach wymaga stosowania specjalnych, hermetycznych pieców z aktywną atmosferą gazową. W skład gazów do nawęglania wchodzi tlenek węgla oraz węglowodory nasycone i nienasycone. W praktyce stosuje się najczęściej gaz ziemny, gaz świetlny lub pary pirobenzolu wtryskiwanego kroplami do gorącej komory pieca. W nagrzanej komorze pieca następuje dysocjacja składników wg reakcji:





W każdym przypadku w wyniku dysocjacji powstaje aktywny węgiel, który dyfunduje do austenitu.

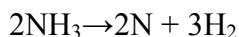
Proces nawęglania w gazach przebiega, podobnie jak w środowisku ciekłym lub stałym, w temperaturze wyższej od temperatury przemiany A_3 . Ponadto w odniesieniu do gazów musi on przebiegać w ściśle określonych warunkach, gdyż ich zmiana powoduje zaburzenia w procesie. Na przykład zbyt intensywna dysocjacja powoduje osadzanie się węgla w postaci sadzy na przedmiotach poddawanych nawęglaniu. Zwolnienie procesu dysocjacji poniżej zdolności absorbowania węgla przez stal powoduje jej niedostateczne nawęglanie.

Po nawęglaniu w gazach obróbka cieplna przebiega jak po nawęglaniu w innych środowiskach.

Azotowanie

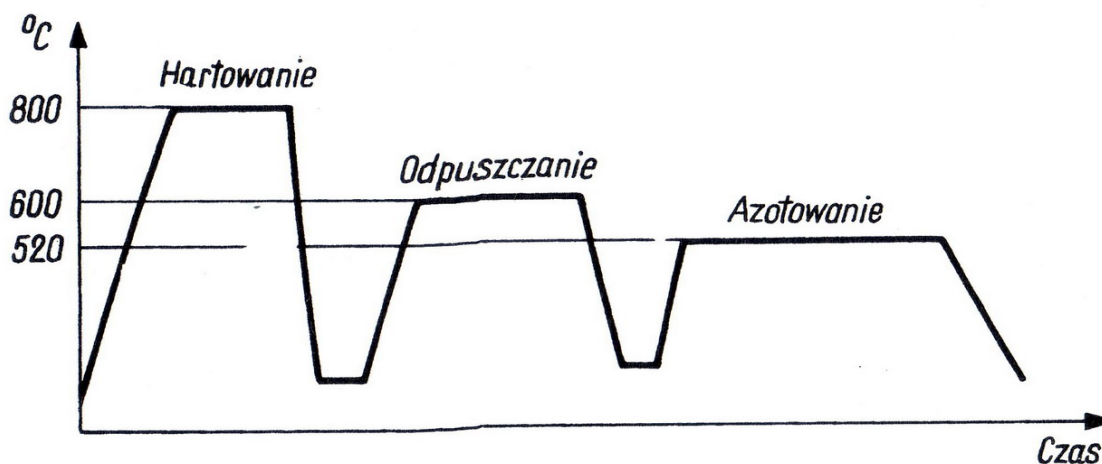
Azot atmosferyczny (cząsteczkowy) nie działa na żelazo. Jeżeli jednak podziela się azotem atomowym wytwarzanym z reakcji, to w chwili tworzenia się jest on aktywny i łatwo wiąże się z żelazem, tworząc roztwory stałe, a nawet związki chemiczne. Gdy w stali znajdują się jeszcze inne dodatki stopowe wiążące się z azotem, jak np. aluminium, chrom, molibden lub tytan, w takiej stali powstają jeszcze azotki tych składników. Azotki żelaza i azotki wymienionych składników stopowych są bardzo twarde. Ich twardość jest większa od twardości martenzytu.

Proces azotowania odbywa się w specjalnych piecach, przez które przepływa amoniak. W temperaturze pracy pieca, zwykle w zakresie $520\div 540^\circ\text{C}$, amoniak ulega dysocjacji wg reakcji:



Azotowanie jest procesem długotrwałym. Czas azotowania wynosi średnio około 30 h. W niektórych przypadkach stale azotuje się nawet w ciągu około 100 h. Grubość warstwy uzyskanej w tak długotrwałym procesie nie jest jednak zbyt duża. Jej grubość zależy od wielu czynników: od temperatury procesu, stopnia dysocjacji amoniaku, składu chemicznego stali i innych.

Przedmioty przeznaczone do azotowania są uprzednio ulepszone cieplnie i szlifowane na ostateczny wymiar. Azotowanie prawie zupełnie nie wpływa na zmianę wymiarów przedmiotów, a ich powierzchnia nie ulega w tym procesie uszkodzeniu.



Rys. 6. Schemat procesu azotowania

Po azotowaniu nie stosuje się już innej obróbki cieplnej, gdyż wytworzone na powierzchni przedmiotu warstwy azotków są twarde, a naprężenia własne uległy likwidacji podczas azotowania.

Schemat procesu azotowania przedstawiono na rys. 6.

Azotowanie ma na celu otrzymanie bardzo twardych powierzchni odpornych na ścieranie. Niekiedy stosuje się azotowanie krótkotrwałe wykonywane kilkakrotnie w różnej temperaturze. Celem takiego azotowania jest utworzenie cienkiej warstwy azotków odpornych na korozję.

Miejsca nie przewidziane do nawęglania lub azotowania można zabezpieczyć przez ich uprzednie miedziowanie.

Cyjanowanie

Podczas cyjanowania zachodzą jednocześnie dwa znane nam już procesy, a mianowicie – nawęglanie i azotowanie. W wyniku cyjanowania zewnętrzne warstwy stali wzbogacają się w węgiel i azot. Czynnikiem decydującym o tym, który z tych dwóch procesów będzie przebiegał intensywnie, jest temperatura. Cyjanowanie w temperaturze powyżej 800°C powoduje niemal wyłącznie nawęglanie stali. Obniżenie temperatury procesu do około 500°C całkowicie zatrzymuje proces nawęglania, a przyspiesza – azotowanie.

Do cyjanowania nadają się w zasadzie wszystkie rodzaje stali, lecz najlepsze wyniki uzyskuje się w stali zawierającej chrom. Cyjanowanie może się odbywać w środowiskach: stałym, ciekłym i gazowym. Najczęściej stosuje się jednak cyjanowanie w kąpielach zawierających związki cyjanowe.

Do cyjanowania w niższej temperaturze, tj. do około 600°C, stosuje się roztopiony cyjanek sodu, natomiast w wyższej temperaturze, tj. do około 800°C, w skład kąpeli cyjanującej – prócz cyjanku sodu – wchodzi sól kuchenna i soda.

W wysokiej temperaturze procesu zachodzą reakcje, w wyniku których wydziela się azot i węgiel. Dyfundują one w chwili tworzenia do stali.

Stale cyjanowane w wyższej temperaturze są poddawane hartowaniu, zazwyczaj bezpośrednio po kąpeli cyjanującej. Cyjanowanie w wysokiej temperaturze stosuje się do części przyrządów precyzyjnych i pomiarowych, które powinny odznaczać się wielką odpornością na ścieranie. Ponadto – niekiedy – cyjanuje się koła zębate, sworznie tłokowe, niektóre części sprzęgieł i inne. Czas przebywania przedmiotów w kąpeli cyjanującej wynosi 2÷3 h. Uzyskuje się wówczas warstwy nawęglone grubości około 0,8 mm.

Stale cyjanowane w niższej temperaturze nie podlegają już żadnej obróbce cieplnej. W wyniku takiego cyjanowania uzyskuje się warstwy bardzo cienkie – o grubości nie przekraczającej 0,05 mm.

Cyjanowanie w niższej temperaturze stosuje się przeważnie do narzędzi wykonanych ze stali szybko tnącej lub wysokochromowej. Czas cyjanowania narzędzi zależy od ich wielkości. Narzędzia małe cyjanuje się w ciągu około 10 minut, a duże – około 40 minut.

Głównymi zaletami cyjanowania są:

- skrócenie czasu procesu w stosunku do czasu nawęglania,
- uzyskanie bardzo twardych powłok odpornych na ścieranie,
- stosunkowo niska temperatura procesu.

Cyjanowanie ma również wiele wad, z których najważniejsze to: niebezpieczeństwo zatrucia pracowników parami soli cyjanowych i konieczność częstego kontrolowania składu kąpeli.

Aluminiowanie

Aluminiowanie, zwane inaczej aliterowaniem lub kaloryzowaniem, polega na wprowadzeniu glinu do stali. Proces nasycania glinem odbywa się w mieszaninie sproszkowanego aluminium, tlenku aluminium i chlorku amonu w temperaturze około 900°C. Grubość warstwy wzbogaconej w glin zależy od czasu trwania procesu. Po 24 godzinach osiąga się warstwę grubości 1 mm, zawierającą około 50% Al.

Aluminiowaniu poddaje się przedmioty przeznaczone do pracy w podwyższonej temperaturze w atmosferze utleniającej. Utworzona na warstwie aluminium warstwa tlenków chroni metal podłoża przed dalszym utlenianiem. Wadą tych warstw jest ich kruchość.

4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Na czym polega nawęglanie?
2. W jakich środowiskach następuje nawęglanie?
3. W jakim celu stosujemy azotowanie?
4. Na czym polega cyjanowanie?
5. Na czym polega aluminiowanie?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Przeprowadzanie procesu nawęglania określonego wałka wykonanego ze stali stopowej 20 H.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) zapoznać się z instrukcją wykonania nawęglania,
- 2) przygotować stanowisko do przeprowadzenia procesu nawęglania,
- 3) przeprowadzić proces nawęglania określonego przedmiotu,
- 4) sprawdzić jakość wykonanego nawęglania.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- stanowisko dydaktyczne do przeprowadzenia procesu nawęglania,
- instrukcje, tablice, foliogramy, filmy o tematyce nawęglania,
- literatura dostępna w punkcie 6 Poradnika dla ucznia.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) wyjaśnić istotę nawęglania?
- 2) zdefiniować, w jakich środowiskach występuje nawęglanie?
- 3) przeprowadzić proces nawęglania określonego przedmiotu?
- 4) wyjaśnić, na czym polega azotowanie?
- 5) wyjaśnić, na czym polega aluminiowanie?

Tak Nie

☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐

5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

INSTRUKCJA DLA UCZNIA

1. Przeczytaj uważnie instrukcję.
2. Podpisz imieniem i nazwiskiem kartę odpowiedzi.
3. Zapoznaj się z zestawem pytań testowych.
4. Test zawiera 7 pytań. Do każdego pytania dołączone są 4 możliwości odpowiedzi. Tylko jedna jest prawidłowa.
5. Udzielaj odpowiedzi tylko na załączonej karcie odpowiedzi, stawiając w odpowiedniej rubryce znak X. W przypadku pomyłki należy błędną odpowiedź zaznaczyć kółkiem, a następnie ponownie zakreślić odpowiedź prawidłową.
6. Pracuj samodzielnie, bo tylko wtedy będziesz miał satysfakcję z wykonanego zadania.
7. Kiedy udzielenie odpowiedzi będzie Ci sprawiało trudność, wtedy odłóż jego rozwiązanie na później i wróć do niego, gdy zostanie Ci wolny czas.
8. Na rozwiązanie testu masz 20 min.
Powodzenia!

Zestaw pytań testowych

1. Istotą ulepszania cieplnego jest:
 - a) przeprowadzenie procesu nawęglania,
 - b) przeprowadzenie procesu azotowania,
 - c) przeprowadzenie procesu hartowania i odpuszczania,
 - d) przeprowadzenie procesu wygrzewania.
2. Poniżej jakiej zawartości węgla nie przeprowadza się procesu obróbki cieplnej?
 - a) poniżej 0,25%C,
 - b) poniżej 0,30%C,
 - c) poniżej 0,40%C,
 - d) poniżej 0,10%C.
3. Perlitem nazywamy:
 - a) drobnoziarnistą mieszaninę ferrytu i cementytu,
 - b) cementyty wtórny,
 - c) lendeburyt przemieniony,
 - d) cementyt trzeciorzędowy.
4. Hartowanie powierzchniowe polega na:
 - a) nagrzaniu materiału na wskroś a następnie szybkim schłodzeniu,
 - b) nagrzaniu powierzchni materiału do właściwej temperatury i szybkim schłodzeniu,
 - c) nagrzaniu materiału na wskroś i powolnemu schłodzeniu,
 - d) nagrzaniu powierzchni materiału do właściwej temperatury i powolnemu schłodzeniu.

5. Zasadniczym celem odpuszczania jest:
- a) zmniejszenie naprężeń, kruchości i twardości stali,
 - b) zlikwidowanie naprężeń wewnętrznych stali,
 - c) ujednolicenie struktury stali,
 - d) zwiększenie twardości.
6. Jaki jest cel nawęglania stali?
- a) wprowadzenie węgla do warstw powierzchniowych stali o małej zawartości węgla poniżej 0,25%C,
 - b) wprowadzenie węgla na wskroś przedmiotu o małej zawartości węgla poniżej 0,25%C,
 - c) usunięcie węgla z powierzchni stali,
 - d) podniesienie zawartości węgla w stalach powyżej 0,35%C.
7. Cyjanowanie to proces:
- a) nawęglania,
 - b) azotowania,
 - c) nawęglania i jednocześnie azotowania,
 - d) aluminowania.

KARTA ODPOWIEDZI

Imię i nazwisko.....

Wykonywanie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej

Zakreśl poprawną odpowiedź

Nr zadania	Odpowiedź				Punkty
1	a	b	c	d	
2	a	b	c	d	
3	a	b	c	d	
4	a	b	c	d	
5	a	b	c	d	
6	a	b	c	d	
7	a	b	c	d	
Razem:					

6. LITERATURA

1. Okoniewski S. : Technologia Maszyn. WSiP, Warszawa 1999
2. Bartosiewicz J.: Obróbka i montaż części maszyn. WSiP, Warszawa 1995
3. Górecki A.: Technologia ogólna WSiP, Warszawa 1984