

PRZEDMIOT: PODSTAWY NAUKI O MATERIAŁACH II (Tworzywa Metaliczne)

Temat ćwiczenia:

STRUKTURY STALI OBROBIONYCH CIEPLNIE

I. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest:

- poznanie podstawowych zabiegów obróbki cieplnej,
- sprawne posługiwanie się wykresami Fe – C i CTP przy analizowaniu zmian zachodzących w trakcie procesów obróbki cieplnej,
- określanie wpływu różnych czynników na przebieg zabiegów obróbki cieplnej,
- analizowanie wpływu obróbki cieplnej na właściwości stali i jakość wyrobów,
- obserwacja zmian struktury w wybranych próbkach powstałych w wyniku przeprowadzonych procesów obróbki cieplnej,
- umiejętność dobierania odpowiednich procesów i parametrów obróbki cieplnej do uzyskiwania wymaganych właściwości stopów.

Wstęp

Obróbka cieplna jest dziedziną technologii obejmującą zespół zabiegów cieplnych mających na celu zmianę struktury stopów w stanie stałym, a przez to nadanie im pożądanych właściwości mechanicznych, fizycznych lub chemicznych. Jako środek do tego celu stosuje się podnoszenie lub obniżanie temperatury obrabianego cieplnie przedmiotu – są to zabiegi: nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia.

Nazwy i określenia oraz klasyfikacja obróbki cieplnej są przedmiotem normy: PN-93/H-01200.

II. PODSTAWY TEORETYCZNE OBRÓBKII CIEPLNEJ

Przemiany podczas chłodzenia

Zabiegi obróbki cieplnej mogą być realizowane poniżej i powyżej temperatur krytycznych tzn. poniżej lub powyżej temperatury przemiany fazowej lub alotropowej stopu lub metalu. Większość zabiegów obróbki cieplnej wymaga nagrzewania do temperatur wyższych od krytycznej. Wraz ze wzrostem szybkości nagrzewania przemiany fazowe przebiegają w wyższej temperaturze i w krótszym czasie. Efektem dużych szybkości nagrzewania jest obniżenie wielkości krytycznej zarodka powstającej fazy, a tym samym zwiększenie dyspersji powstającej fazy

Intensywność chłodzenia z temperatur ponadkrytycznych w istotny sposób wpływa na zmiany mikrostruktury, a tym samym własności mechaniczne i fizykochemiczne metali i stopów. W warunkach wolnego chłodzenia (studzenia) przemiany zachodzą po okresie inkubacji zgodnie z układem równowagi dla danego stopu. Wraz ze wzrostem szybkości chłodzenia następuje przesunięcie przemian do niższej temperatury, zmniejszenie okresu inkubacji (trwałości przechłodzonej fazy), zwiększenie szybkości zarodkowania i wzrostu powstającej fazy.

W stopach Fe – C w zależności od przechłodzenia austenitu mogą zachodzić przemiany:

- **perlityczna** – przemiana dyfuzyjna, co oznacza, że do jej rozpoczęcia i przebiegu konieczne jest przegrupowanie atomów węgla i żelaza drogą dyfuzji. Przemiana rozpoczyna się pojawieniem zarodków cementytu na granicy ziaren austenitu. Dzięki dyfuzji węgla z otaczającego te zarodki austenitu, cząsteczki cementytu stopniowo rozrastają się tworząc płytki, a tym samym austenit o małej zawartości węgla ulega przemianie na ferryt. Ponieważ ferryt prawie nie zawiera węgla, w sąsiednim obszarze austenitu następuje wzrost koncentracji węgla, co prowadzi do powstania nowej płytki cementytu itd. Tak powstaje perlit, przy czym w jednym ziarnie austenitu powstaje kilka obszarów złożonych z równoległych pasemek ferrytu i cementytu.

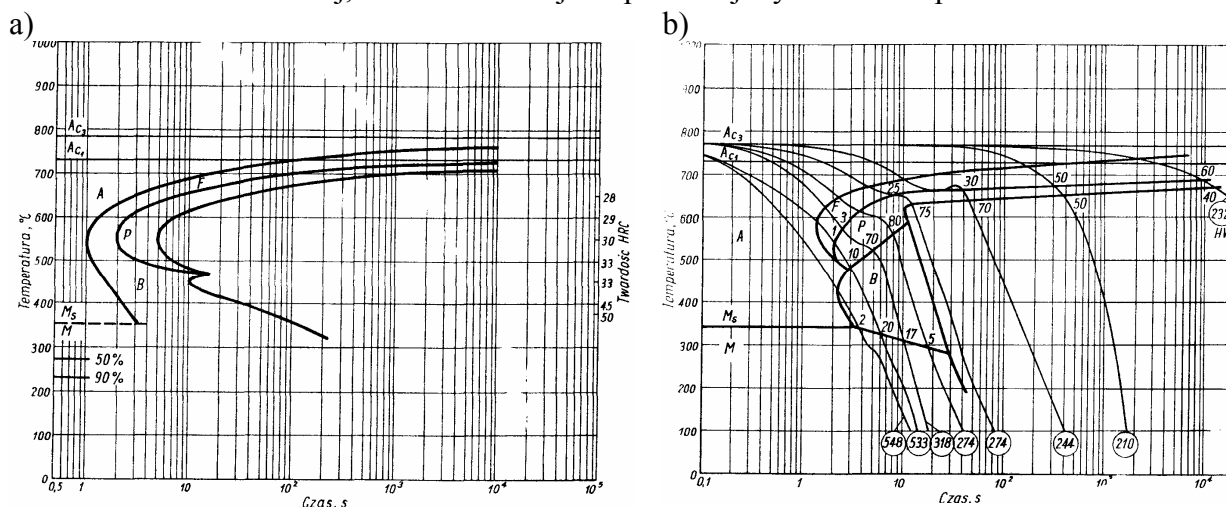
- **martenzytyczna** - przemiana bezdyfuzyjna (cecha charakterystyczna wyraźnie odróżniająca ją od pozostałych przemian) - następuje tylko przebudowa sieci przestrzennej żelaza γ na żelazo α bez zmiany koncentracji węgla w roztworze stałym, otrzymana struktura to martenzyt. – przesycony roztwór stały węgla w żelazie α . Obecność nadmiernej ilości atomów węgla powoduje zniekształcenie sieci żelaza α co powoduje dużą twardość i jednocześnie kruchość martenzytu.

- **bainityczna** – przemiana pośrednia między perlityczną i martenzytyczną. Rozpoczyna się od utworzenia zarodków ferrytu, które powstają na granicach ziaren austenitu na skutek fluktuacji stężenia węgla. Z powstałych płytek ferrytu wydziela się następnie cementyt. Bainit jest więc mieszaniną ferrytu przesyconego węglem i węglików.

Ilościowe dane dotyczące rodzaju przemiany i własności stali od temperatury i czasu przemiany przechłodzonego austenitu przedstawiane są na wykresach CTP (czas – temperatura – przemiana). Wykresy te obrazują dynamikę przemian metastabilnego przechłodzonego austenitu. W zależności od sposobu chłodzenia dla różnych gatunków stali są opracowywane wykresy:

- CTP_i – przy chłodzeniu izotermicznym – rys. 1a
- CTP_c – przy chłodzeniu ciągłym – rys. 1b

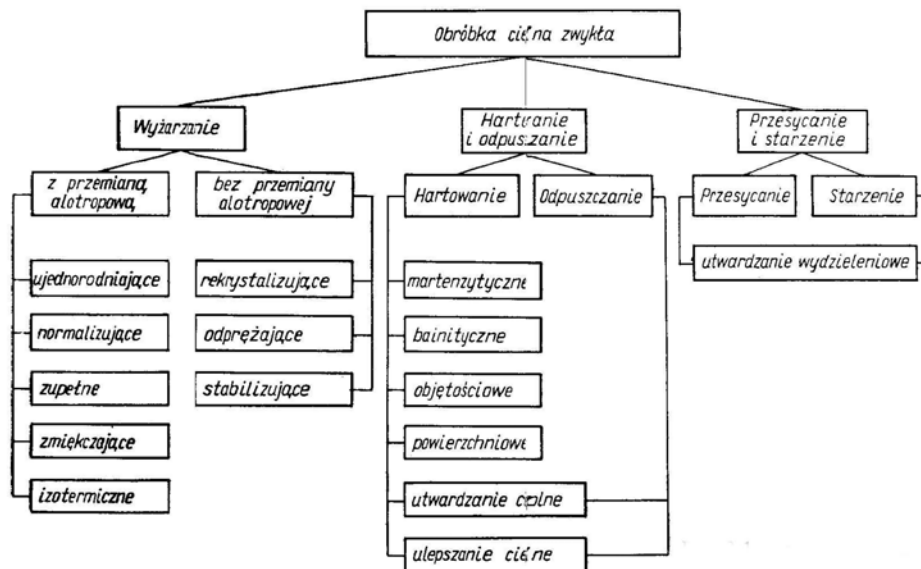
Na wykresach izotermicznych pierwsza krzywa C oznacza początek, a druga koniec przemiany austenitu w perlit, bainit i martenzyt w zależności od czasu przy stałej temperaturze przemiany. Czas rozpoczęcia i zakończenia każdej przemiany odczytuje się z wykresu przez rzutowanie na oś czasu punktów przecięcia krzywych początku i końca przemiany z izotermą lub krzywa według której przebiega przemiana. Wykresy CTP_i wykorzystywane są do określania temperatury i czasu wygrzewania podczas wyżarzania izotermicznego oraz wychładzania w zabiegach hartowania izotermicznego lub stopniowego. Wykresy CTP_c znalazły zastosowanie do ustalania struktury i twardości stali hartowanej, normalizowanej lub poddanej wyżarzaniu zupełnemu.



Rys.1. Wykres dla stali 45: a) CTP_i , b) CTP_c

KLASYFIKACJA OBRÓBKİ CIEPLNEJ

W zależności od temperatury zabiegu obróbki cieplnej, rodzaju zabiegów wchodzących w skład operacji, jak również czasu trwania tych zabiegów oraz od rodzaju stosowanego ośrodka chemicznego, sposobu i temperatury odkształcania plastycznego wyróżnia się różne rodzaje obróbki cieplnej. Do najważniejszych procesów obróbki cieplnej zaliczamy wyżarzanie, hartowanie i odpuszczanie raz przesycanie i starzenie (rys.2).



Rys. 2. Klasyfikacja obróbki cieplnej zwykłej

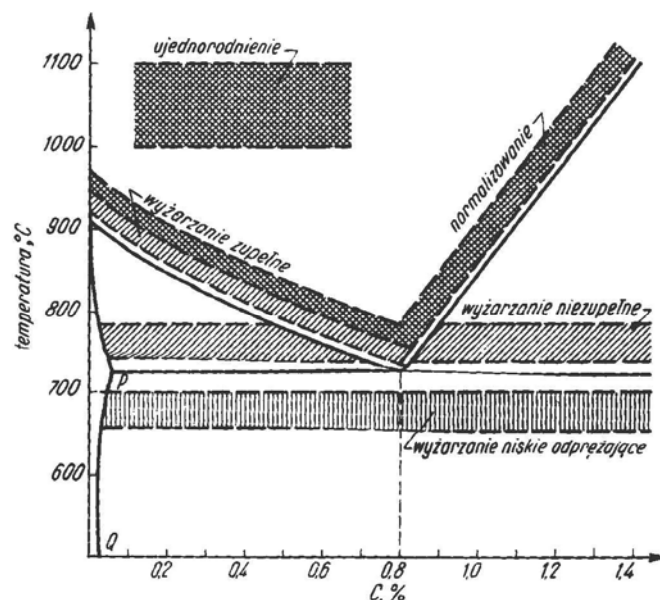
WYŻARZANIE

Wyżarzanie jest to zabieg cieplny polegający na nagrzanii stali do określonej temperatury, wygrzaniu w tej temperaturze i studzeniu w celu uzyskania struktur zbliżonych do stanu równowagi. Procesy wyżarzania można podzielić na dwie grupy:

- z udziałem przemian fazowych (nagrzanie stali do temperatur powyżej temperatur krytycznych A_{c1} lub A_{c3} , A_{cm})
- bez udziału przemian fazowych (odbywających się w temperaturach niższych od A_1).

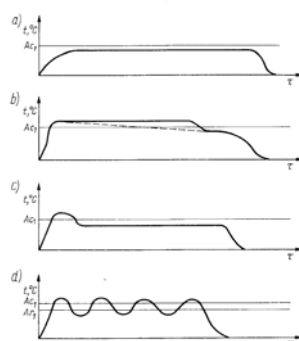
Zależnie od temperatur wygrzewania, sposobu studzenia i celu jaki chce się osiągnąć, rozróżnia się:

- **wyżarzanie ujednorodniające (homogenizujące)** – stosowane we wlewkach i odlewach w celu zmniejszenia niejednorodności składu chemicznego na drodze dyfuzji. Temperatura leży w zakresie ok. $100 \div 150^\circ \text{C}$ poniżej linii solidus – zwykle ok. $1000 \div 1250^\circ \text{C}$. Bardziej jednorodny skład wlewka ułatwia jego dalszą obróbkę plastyczną i cieplną, zmniejsza naprężenia, a tym samym skłonność do pękania. Efektem ubocznym długotrwałego wyżarzania (12- 24 godzin) w wysokiej temperaturze jest rozrost ziaren.
- **wyżarzanie normalizujące** – celem jest uzyskanie jednolitej, drobnoziarnistej struktury i związane z tym polepszenie właściwości mechanicznych. Polega na nagrzanii stali o $30^\circ \div 50^\circ \text{C}$ powyżej linii ($A_3 - A_{cm}$) wygrzaniu aż do uzyskania struktury austenitycznej i chłodzeniu na powietrzu. Normalizowaniu poddaje się najczęściej odlewy stalowe w celu rozdrobnienia ziarna i usunięcia struktury Widmanstättena.



Rys.3. Zakres temperatur niektórych rodzajów wyżarzania

- **wyżarzanie zupełne i niezupełne** – operacje te różnią się od normalizowania zmniejszeniem prędkości chłodzenia, które w praktyce realizuje się z piecem. Dzięki temu struktura stali jest bardziej zbliżona do stanu równowagi, a stal ma mniejszą twardość i większą ciągliwość niż po normalizowaniu.
- **wyżarzanie zmiękczające (sferoidyzujące)** – ma na celu koagulację (sferoidyzację) węglików, przez co uzyskuje się najmniejszą twardość i najbardziej plastyczną strukturę, jaką dla danej stali można osiągnąć. Takie właściwości uzyskuje się dzięki sferoidyzacji cementytu – otrzymuje się kulkowy cementyt tzw. sferoidyt. Taka struktura jest korzystna jako wyjściowa do ulepszania cieplnego niektórych stali np. łożyskowych. W praktyce wyżarzanie zmiękczające jest realizowane różnymi sposobami: (rys. 4)

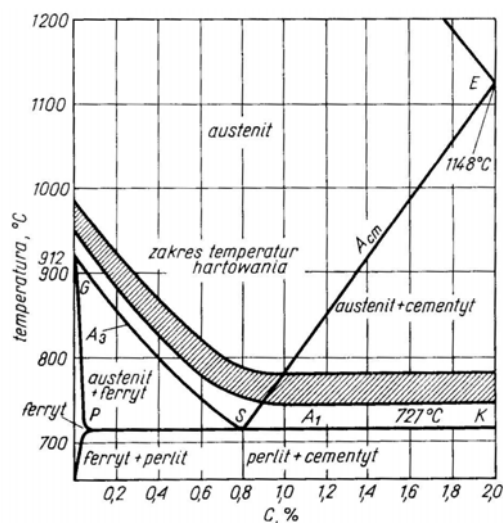


Rys. 4. Schemat różnych wariantów wyżarzania sferoidyzującego stali

- **wyżarzanie rekrytalizujące** – polega na nagraniu uprzednio zgniecionej stali do temperatury nieco wyższej od temperatury początku rekrytalizacji, wygrzaniu w tej temperaturze i chłodzeniu. Zabieg ten stosuje się do materiału uprzednio poddanego przeróbce plastycznej na zimno i ma na celu usunięcie skutków zgniotu.
- **wyżarzanie odprężające** – ma na celu zmniejszenie naprężeń własnych elementów stalowych, powstałych w procesach technologicznych (np. przeróbka plastyczna na gorąco, obróbka mechaniczna, spawanie) nie powodując przy tym zmiany struktury stali i w związku z tym nie obniżając jej twardości i wytrzymałości. Temperatura procesu – najczęściej ok. 600 ÷ 700°C, czas wygrzania od kilku godzin do kilku dni w zależności od wielkości przedmiotu.

HARTOWANIE

Hartowanie jest to zabieg cieplny polegający na nagrzanii elementu do temperatury $30 \div 50^\circ\text{C}$ powyżej $A_{c3} - A_{c1}$, wygrzaniu w tej temperaturze, a następnie chłodzeniu z prędkością większą od krytycznej w celu otrzymania struktury martenzytycznej lub bainitycznej, a przez to zwiększenie twardości stali.



Rys. 5. Zakres temperatur hartowania stali węglowej

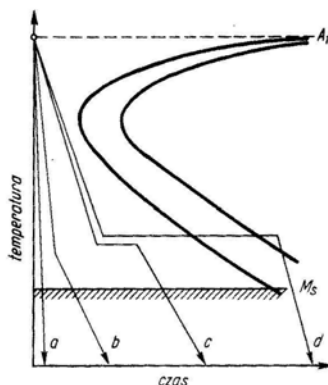
Szybkie chłodzenie przy hartowaniu ma na celu przechłodzenie austenitu do zakresu temperatur przemiany martenzytycznej – poniżej M_s –, w którym to zakresie temperatur austenit ulega przemianie na martenzyt. Przy doborze środka chłodzącego należy unikać szybszego niż to konieczne chłodzenia, gdyż ze wzrostem szybkości chłodzenia powstają duże naprężenia hartownicze i wzrasta w związku z tym tendencja do odkształceń lub pęknięć.

Najczęściej stosowane ośrodki chłodzące to ośrodki ciekłe: woda i roztwory wodne, oleje i tłuszcze, stopione sole i metale.

Sposoby hartowania

Ze względu na sposób chłodzenia rozróżnia się:

- **hartowanie zwykłe** – po austenitowaniu wykonuje się chłodzenie elementu w sposób ciągły z szybkością większą od krytycznej w odpowiednio dobranym ośrodku,
- **hartowanie stopniowe** – po austenitowaniu przedmiot ochładza się w kąpeli, której temperatura jest wyższa od M_s i wytrzymuje przez okres konieczny do wyrównania temperatur na powierzchni i w rdzeniu. Dzięki wyrównaniu temperatur na przekroju elementu i zanikają naprężenia i zmniejsza się skłonność do pękania i paczania elementów,
- **hartowanie izotermiczne** (bainityczne) – po austenitowaniu przedmiot oziębia się w kąpeli o temperaturze wyższej od temperatury M_s i przetrzymuje w niej hartowany przedmiot aż do zakończenia przemiany austenitu na bainit, po czym dalsze chłodzenie odbywa się na powietrzu lub w wodzie. Dzięki uniknięciu przemiany martenzytycznej i wyrównaniu temperatury na całym przekroju do minimum redukuje się naprężenia termiczne, a uzyskana struktura bainityczna zapewnia dużą twardość i większą niż w stalach hartowanych na martenzyt ciągliwość i udurowienie.



Rys. 6. Krzywe chłodzenia dla różnych rodzajów hartowania:
a – hartowanie zwykłe, b – hartowanie przerywane, c – hartowanie stopniowe, d – hartowanie z przemianą izotermiczną

Hartowanie powierzchniowe – celem tego hartowania jest uzyskanie twardej, odpornej na ścieranie warstwy powierzchniowej przy zachowaniu ciągłego rdzenia. Polega na szybkim nagrzaniu cienkiej warstwy zewnętrznej i oziębianiu. Nagrzanie musi być bardzo szybkie, a oziębianie natychmiastowe, gdyż w przeciwnym przypadku ciepło przeniknie do głębszych warstw materiału.

W zależności od sposobu nagrzewania rozróżnia się:

- hartowanie płomieniowe – polega na ogrzaniu powierzchni palnikiem gazowym, a następnie intensywnym oziębieniu strumieniem wody,
- hartowanie indukcyjne – ogrzanie odbywa się w wyniku zamiany energii prądów wirowych powstałych w przedmiocie umieszczonym w zmiennym polu magnetycznym, chłodzenie odbywa się przez zanurzenie przedmiotu w kąpeli lub natrysk cieczy chłodzącej.
- hartowanie kąpielowe – polega na nagrzaniu powierzchni przedmiotu poprzez krótkie jego zanurzenie w kąpeli solnej.

ODPUSZCZANIE

Odpuszczanie jest to zabieg cieplny stosowany do przedmiotów uprzednio zahartowanych, polegający na nagrzewaniu temperatury niższej od A_{C1} , wygrzaniu w tej temperaturze i ochłodzeniu do temperatury otoczenia. Jest ono stosowane w celu polepszenia właściwości plastycznych elementów przy jednoczesnym usunięciu naprężeń własnych, które mogłyby doprowadzić do ich pęknięcia.

W zależności od temperatury rozróżniamy:

- **odpuszczanie niskie** - wykonywane w temperaturze $150 \div 200^\circ \text{C}$, którego celem jest częściowe usunięcie naprężeń hartowniczych oraz rozkład austenitu szczątkowego, przy zachowaniu wysokiej twardości. Stosowane jest do narzędzi, sprawdzianów, przedmiotów nawęglanych itp. Uzyskuje się strukturę martenzytu niskoodpuszczonego.
- **odpuszczanie średnie** – odbywające się w temperaturze $250 \div 500^\circ \text{C}$, jego celem jest obniżenie twardości i zwiększenie odporności na uderzenie przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości i sprężystości. Stosowane do sprężyn, resorów, matryc. W tym zakresie temperatur występuje tzw. kruchość odpuszczania, która objawia się spadkiem udarności co spowodowane jest przemianą austenitu szczątkowego lub z nierównomiernym rozpadem austenitu,
- **odpuszczanie wysokie** – przeprowadzane w temperaturze $500 \div 650^\circ \text{C}$ w celu uzyskania jak największej udarności przy wystarczającej wytrzymałości na rozciąganie. Otrzymuje się strukturę sorbityczną złożoną z ferrytu i bardzo drobnych, kulistych wydzieleni węglików. Połączenie zabiegu hartowania z wysokim odpuszczaniem w

celu uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych nosi nazwę **ulepszania cieplnego**.

III. Przebieg ćwiczenia:

Ćwiczenie polega na obserwacji i analizie wybranych struktur stali poddanych różnym procesom obróbki cieplnej.

Wykonanie ćwiczenia:

- przygotowanie mikroskopu metalograficznego do obserwacji,
- obserwacja struktur próbek – przed i po wyżarzaniu normalizującym, zmiękczającym, hartowaniu,
- analiza i porównanie różnic między strukturami przed i po procesach obróbki cieplnej,
- narysowanie i opisanie struktury złądów.

IV. Pytania kontrolne:

1. Co to jest i w jakim celu przeprowadza się obróbkę cieplną?
2. Jakie parametry decydują o przemianach fazowych?
3. Podać klasyfikację rodzajów obróbki cieplnej.
4. Na wykresie Fe-C zaznaczyć temperatury najważniejszych procesów obróbki cieplnej.
5. Podać klasyfikację zabiegów wyżarzania.
6. Omówić wybrane rodzaje wyżarzania.
7. Przeanalizować przemiany zachodzące w trakcie procesów obróbki cieplnej.
8. Narysować wykres CTP dla stali: a) podeutektoidalnej, b) eutektoidalnej, c) nadeutektoidalnej,
9. Na tle wykresu CTP narysuj krzywą chłodzenia warunkującą uzyskanie struktury: a) ferryt + perlit, b) perlit, c) perlit + cementyt, d) perlit + bainit, e) bainit, f) bainit + martenzyt, g) martenzyt
10. Omówić różnice w procesie wyżarzania zupełnego, normalizującego i izotermicznego.
11. Uzasadnić optymalne temperatury hartowania stali.
12. Wyjaśnić zmiany w strukturze zachodzące w trakcie hartowania.
13. Podać zalety poszczególnych rodzajów hartowania objętościowego i powierzchniowego.
14. Omówić sposób przeprowadzenia i zmiany zachodzące w strukturze w trakcie odpuszczania.
15. Wyjaśnić kruchość odpuszczania.
16. Na czym polega ulepszanie cieplne?
17. Omówić znaczenie procesów dyfuzji w obróbce cieplnej.

Literatura:

1. Rudnik St., Metaloznawstwo, PWN, Warszawa 1996,
2. Prowans St., Materiałoznawstwo, PWN, Warszawa, 1997
3. Przybyłowicz K., Metaloznawstwo, WNT, Warszawa 1996
4. Wesołowski K., Metaloznawstwo i obróbka cieplna, WNT, Warszawa 1981