



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ

LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Mieczysław Pancielejko



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Mieczysław Pancielejko

Laboratorium inżynierii materiałowej

KOSZALIN 2024

ISBN 978-83-7365-649-9

Przewodnicząca Uczelnianej Rady Wydawniczej
Monika Matuszkiewicz

Recenzja
Waldemar Kwaśny
Marcin Staszuk

Autor
Mieczysław Pancielejko

Projekt okładki
Aleksandra Iwaszkiewicz
Anna Stępień

© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej
Koszalin 2024

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ
75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17

Koszalin 2024, wyd. I, ark. wyd. 8,11

Spis treści

PRZEDMOWA	7
1. BADANIA METALOGRAFICZNE MAKROSKOPOWE.....	9
1.1. WPROWADZENIE	9
1.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	16
1.2.1. <i>Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....</i>	<i>16</i>
1.2.2. <i>Sprawozdanie powinno zawierać</i>	<i>17</i>
2. BADANIA METALOGRAFICZNE MIKROSKOPOWE.....	18
2.1. WPROWADZENIE	18
2.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	22
2.2.1. <i>Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....</i>	<i>22</i>
2.2.2. <i>Sprawozdanie powinno zawierać</i>	<i>22</i>
2.2.3. <i>Obrazy mikrostruktury.....</i>	<i>22</i>
3. POMIARY TWARDOŚCI	24
3.1. WPROWADZENIE.....	24
3.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	32
3.2.1. <i>Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....</i>	<i>32</i>
3.2.2. <i>Sprawozdanie powinno zawierać</i>	<i>33</i>
4. ZMIANY WŁAŚCIWOŚCI I STRUKTURY ZACHODZĄCE W METALACH PODCZAS ODKSZTAŁCENIA PLASTYCZNEGO	34
4.1. WPROWADZENIE	34
4.1.1. <i>Mechanizm odkształcenia plastycznego.....</i>	<i>34</i>
4.1.2. <i>Wpływ odkształcenia plastycznego na strukturę i właściwości metalu.....</i>	<i>36</i>
4.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	38
4.2.1. <i>Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....</i>	<i>38</i>
4.2.2. <i>Sprawozdanie powinno zawierać</i>	<i>38</i>
4.2.3. <i>Obrazy mikrostruktury.....</i>	<i>39</i>
5. REKRYSYALIZACJA METALI	41
5.1. WPROWADZENIE	41
5.1.1. <i>Rekrystalizacja</i>	<i>41</i>

5.1.2. Obróbka plastyczna	45
5.3. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	48
5.3.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	48
5.3.2. Sprawozdanie powinno zawierać	48
4.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	48
6. ANALIZA METALOGRAFICZNA STRUKTURY FAZ I MIESZANIN WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADZIE ŻELAZO - WĘGIEL.....	50
6.1. WPROWADZENIE	50
6.1.1. Właściwości żelaza i węgla	50
6.1.2. Układ żelazo-węgiel	52
6.1.3. Składniki fazowe i strukturalne układu żelazo-cementyt.....	53
6.1.4. Przemiany w układzie żelazo-cementyt	56
6.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	57
6.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	57
6.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać	58
6.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	58
7. ANALIZA METALOGRAFICZNA ŻELIW NIESTOPOWYCH	63
7.1. WPROWADZENIE	63
7.1.1. Żeliwa niestopowe	63
7.1.2. Proces grafityzacji.....	64
7.1.3. Klasyfikacja żeliw niestopowych	65
7.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	72
7.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	72
7.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać	73
7.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	73
8. STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI STALI NIESTOPOWYCH	76
8.1. WPROWADZENIE	76
8.1.1. Struktura i właściwości stali niestopowych.....	76
8.1.2. Klasyfikacja stali niestopowych	79
8.1.3. Podział stali niestopowych - przeznaczenie oraz zasady znakowania	81
8.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	85
8.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	85
8.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać	86
8.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	86
9. OBRÓBKĄ CIEPLNĄ STALI KONSTRUKCYJNYCH	90
9.1. WPROWADZENIE	90

9.1.1. Teoretyczne podstawy obróbki cieplnej.....	90
9.1.2. Hartowanie	97
9.1.2. Odpuszczanie	99
9.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	102
9.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	102
9.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać	102
9.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	102
10. STRUKTURA STALI STOPOWYCH ORAZ BIOMATERIAŁÓW METALOWYCH	106
10.1. WPROWADZENIE	106
10.1.1. Stale stopowe – wiadomości podstawowe	106
10.1.2. Stale stopowe – klasyfikacja	115
10.1.3. Systemy znakowania stali.....	115
10.1.4. Klasyfikacja stali stopowych wg przeznaczenia	117
10.1.5. Stale stopowe konstrukcyjne i maszynowe.....	117
10.1.6. Stale stopowe narzędziowe	120
10.1.7. Stale i stopy o szczególnych właściwościach.....	122
10.1.8. Stale i inne biomateriały metalowe	125
10.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	125
10.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	125
10.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać.	126
10.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	126
11. IDENTYFIKACJA FAZ ORAZ WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ STALI PO OBRÓBCE CIEPLNO-CHEMICZNEJ	132
11.1. KLASYFIKACJA INNYCH RODZAJÓW OBRÓBKIE CIEPLNEJ.....	132
11.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	136
11.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	136
11.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać:	137
11.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	137
12. ANALIZA STRUKTURY STOPÓW MIEDZI I STOPÓW ŁOŻYSKOWYCH	139
12.1. MIEDŹ I STOPY MIEDZI	139
12.2. STOPY ŁOŻYSKOWE	143
12.3. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	145
12.3.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:.....	145
12.3.2. Sprawozdanie powinno zawierać:	145
12.3.3. Obrazy mikrostruktury.....	146
13. STOPY ALUMINIUM Z MIEDZIĄ, KRZEMEM I MAGNEZEM.....	149

13.1. WPROWADZENIE.....	149
13.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	152
13.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.....	152
13.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać.	153
13.2.3. Obrazy mikrostruktury.....	153
14. PRÓBA STATYCZNA ROZCIĄGANIA POLIMERÓW TERMOPLASTYCZNYCH	156
14.1. MATERIAŁY POLIMEROWE - WPROWADZENIE	156
14.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	159
14.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:.....	159
14.2.2. Opis przebiegu ćwiczenia.....	159
14.2.3. Przygotowanie próbek do badań oraz pomiar wytrzymałości i wydłużenia względego.....	161
14.2.4. Sprawozdanie powinno zawierać:	163
15. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH TWORZYW CERAMICZNYCH.....	164
15.1. WPROWADZENIE	164
15.1.1. Właściwości mechaniczne materiałów inżynierskich.....	164
15.1.2. Wytrzymałość statyczna	164
15.1.3. Właściwości mechaniczne materiałów ceramicznych.....	167
15.2. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA	172
15.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:.....	172
15.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać:	172
BIBLIOGRAFIA.....	173
WYKAZ NORM	174
ZAŁĄCZNIKI	177
INSTRUKCJA DOTYCZĄCA ZASAD BHP PODCZAS ZAJĘĆ LABORATORYJNYCH.....	178
WZÓR TABELI DO SPRAWOZDANIA Z ZAJĘĆ LABORATORYJNYCH	180

Przedmowa

Niniejszy skrypt „Laboratorium inżynierii materiałowej” opracowany został w ramach projektu „Dostępna uczelnia – Politechnika Koszalińska” POWR.03.05.00-00-A018/20. Skrypt przeznaczony jest dla studentów Wydziału Mechanicznego, studiów stacjonarnych i niestacjonarnych, na kierunkach Mechatronika oraz Inżynieria Biomedyczna. Zgodnie z programem studiów na tych kierunkach studenci przystępując do ćwiczeń laboratoryjnych mają ogólne przygotowanie poprzez wcześniejsze wysłuchanie wykładów: Nauka o materiałach I i II, Metale i stopy, Materiały niemetalowe i nanomateriały. W związku z powyższym skrypcie nie zamieszczono podstawowych zagadnień, lecz tylko treści zawarte w programie nauczania tego laboratorium. Kolejne rozdziały, to tematy poszczególnych ćwiczeń, które zwykle wykonywane są w czasie 2-godzinnych zajęć. Skrypt zawiera 15 rozdziałów, co umożliwia wybór tematów ćwiczeń dostosowanych dla różnych kierunków.

Skrypt opracowany został w Katedrze Fizyki Technicznej i Nanotechnologii, Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej przez prowadzącego te ćwiczenia laboratoryjne, więc opisane zostały zagadnienia, które zwykle stwarzają studentom trudności. Starano się je przedstawić w jak najbardziej przystępny sposób. W częściach teoretycznych zawarto szereg ilustracji i schematów oraz zdjęć metalograficznych z bazy posiadanych materiałów. W częściach praktycznych zamieszczono przykładowe obrazy mikrostruktury stopów badanych przez studentów – są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich z lat ubiegłych, które wiernie przedstawiają szczegóły budowy stopów, co świadczy o wnikliwej obserwacji i analizie występujących składników strukturalnych, a jednocześnie o zdolnościach plastycznych studentów. Baza tych szkiców kolekcjonowana była przez kilkadziesiąt lat i nie sposób jest teraz imiennie wymienić ich Autorów, aby im podziękować za ich wkład w przygotowanie tego skryptu.

Autor jest szczególnie wdzięczny dr hab. inż. Danieli Herman oraz dr. inż. Wiesławowi Walkowiakowi za wsparcie w opracowaniu niniejszego skryptu. Autor składa również serdeczne podziękowania dla dr. hab. inż. Waldemara Kwaśnego oraz dr. hab. inż. Marcina Staszuka za cenne, życzliwe uwagi zawarte w recenzjach. Podziękowania kierowane są również do Redaktorów z Wydawnictwa Uczelnianego Politechniki Koszalińskiej za redakcję techniczną.

Autor

1. Badania metalograficzne makroskopowe

1.1. Wprowadzenie

Materiały i części maszyn badane są w różnych okolicznościach. Zazwyczaj są to badania podstawowe, mające na celu poprawę jakości materiału na wstępnym etapie projektowania, np. dobór właściwości kompozytów, określenie przydatności nowych materiałów, w czasie kontroli jakości i przy ustalaniu przyczyn awarii. Badania makroskopowe są szczególnie istotne. Prowadzenie takich badań na elementach gotowych wyrobów jest szczególnie uzasadnione. Podstawowe cele badań makroskopowych, to:

- zbadanie budowy wewnętrznej wyrobu,
- identyfikacja wad materiałowych,
- poznanie metody wytwarzania elementu,
- określenie przyczyn awarii.

Badania makroskopowe, polegają na obserwacji specjalnie przygotowanych szlifów powierzchni, zwanych też zglądami, oraz przełomów części maszyn, nazywanych też złomami. Badania prowadzone są „okiem nieuzbrojonym” lub przy zastosowaniu niewielkich powiększeń do 30 razy, czasami do 50 razy, jednak bardzo rzadko jest stosowane takie powiększenie. Pod pojęciem makrostruktury rozumie się takie cechy budowy wewnętrznej, które obserwować można przy zachowaniu powyższych warunków.

Obserwowanie makrostruktury, nie jest badaniem mało znaczącym ani zgrubnym, ponieważ przewagą takich badań nad analizą mikrostruktury jest określenie wewnętrznej budowy oraz jednorodności materiału na obszarze znacznie większym. Zastosowanie tylko badań mikroskopowych może powodować, że przypadkowo wybrany będzie mały obszar, który cechować się będzie znacznym podobieństwem w tej strefie, a wyraźnie różnić się od stref, które występują poza zasięgiem obserwacji mikroskopowych. Ocena jednorodności wewnętrznej budowy materiału na dostatecznie dużej powierzchni jest szczególnie zaletą badań makroskopowych. Przykładowo największa powierzchnia obserwowana pod mikroskopem, przy najmniejszych powiększeniach, może mieścić się na obszarze o średnicy nie większej niż 0,5 mm.

Wady materiałowe wewnątrz i na powierzchni części są najczęściej przyczyną uszkodzeń części maszyn i urządzeń, które powstają w trakcie ich eksploatacji. Wady te powstawać mogą w trakcie procesu technologicznego, również podczas eksploatacji urządzeń. Czas eksploatacji, to zarówno proces zdolności elementu podczas użytkowania, jak i dodatkowe remonty, w których

zdatność ta jest przywracana ponownie. Również w czasie remontów ujawnić się mogą uszkodzenia i wady materiałowe, co skutkować może skróceniem czasu między remontami, a nawet krytyczną awarią elementu.

Celem badań makroskopowych jest umożliwienie wykrycia oraz ocena:

- jaka jest niejednorodność składu chemicznego w odlewach i wyrobach po przeróbce plastycznej, np. rozkład węgla, siarki i fosforu w stopach żelaza (rys. 1.1),
- struktury pierwotnej odlewów, ukazanie struktury dendrytycznej oraz trans krystalicznych płaszczyzn łupliwości (rysunek 1.2),
- układu włókien oraz płaszczyzn poślizgu po zgnieciu, struktury pasmowej (włóknistej) w częściach odkształcanych plastycznie np. poprzez kucie, walcowanie, ciągnięcie (rys. 1.3),
- niejednorodności struktury pochodzenia mechanicznego, np. lokalny zgniot; lub cieplnego, np. strefy wpływu ciepła złącza spawanego (rys. 1.4),
- nieciągłości w materiale, w postaci: pozostałości jam skurczowych, rzadziły skurczowe, pęcherze gazowe wewnątrz i pod powierzchnią (rys. 1.5), mikropory oraz wtrącenia niemetaliczne, zażużlenia, zawalcowania, zakucia, pęknięcia powstające w procesie technologicznym (np. po hartowaniu, szlifowaniu, odlewnicze, czy powstające podczas przeróbki plastycznej), a także powstałe w trakcie eksploatacji,
- określenie wielkości ziarna – np. badania hartowności stali na przelomach według skali Jernkontoret,
- niejednorodności struktury oraz składu chemicznego w wyrobach stalowych po obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej, pozwalające na określenie grubości warstwy po hartowaniu (rys. 1.6), nawęglaniu, azotowaniu, węgloazotowaniu, odwęglonej,
- właściwości plastycznych i charakteru przelomu (rys. 1.7ab).

Znaczna część wad materiałowych widoczna jest gołym okiem bez konieczności trawienia powierzchni zglądu próbki. Niektóre spośród wad materiałowych wewnątrz struktury, jak na zewnątrz, nie są ujawnione od razu po wycięciu próbki, również po jej szlifowaniu. Wymaga to wtedy zastosowania odpowiednich odczynników trawiących. W zależności od celu i rodzaju badań używane są różne odczynniki, zależnie od tego, co ma być ujawnione. Odczynniki te podzielić można na dwie podstawowe grupy (PN-CR 12361:2002):

- kwasowe – działające korodująco,
- miedziowe – działające elektrolitycznie.

Działanie odczynników polega na takim mechanizmie, że reagują one silniej w miejscach odkształconych plastycznie, na granicach ziaren oraz w miejscach występowania zanieczyszczeń (siarka, fosfor). Na obszarach tych następnie w zależności od chemicznego składu odczynników powierzchnia zglądu uzyskuje różne zabarwienie.

Próba Baumana (PN-87/H-04514) stosowana jest poznania rozmieszczenia siarki, która związana jest w postaci siarczków manganu lub żelaza na powierzchni próbki. Podczas zachodzących reakcji chemicznych (1.1, 1.2) między siarczkami z powierzchni próbki, a 5% roztworem wodnym kwasu siarkowego, a następnie z bromkiem srebra z emulsji papieru fotograficznego (1.3).

Reakcje na powierzchni próbki:



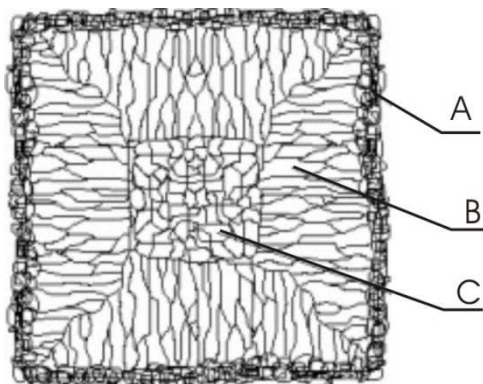
Reakcja na powierzchni papieru fotograficznego:



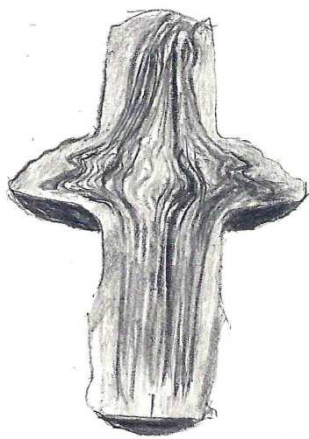
Powstające na papierze fotograficznym zaciemnienia pochodzą od siarczku srebra. Wielkością oraz kształtem odpowiadają wtrąceniom siarki występującej w stopach żelaza (rys. 1.1). Nie jest to próba ilościowa. Z widocznego rozkładu wtrąceń siarczkowych można wnioskować o przeprowadzonym odkształceniu plastycznym materiału lub o występowaniu pozostałości jamy usadowej oraz zwiększonej koncentracji fosforu w odlewach.



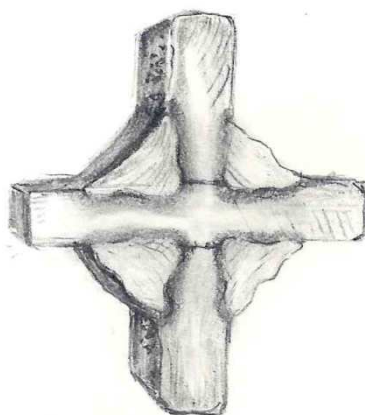
Rys. 1.1. Spoina doczołowa: a) typu X, b) typu Y. Niejednorodność składu chemicznego w złączach spawanych określona w próbie Baumanna. Widoczne zaciemnienie papieru fotograficznego w miejscach występowania siarczków



Rys. 1.2. Przykład schematu makrostruktury w przekroju poprzecznym wlewka: A – drobnoziarnista struktura, kryształów zamrożonych (szybkie i wielokrotne zarodkowanie); B – strefa przejściowa, z kryształami kolumnowymi (zarodkowanie, powolny wzrost kryształów prostopadle do ścianek wlewka); C – struktura z ziarnami równoosiowymi (ziarna równomiernie zarodkują i narastają) [Blic-17-1]



Rys. 1.3. Szkic szlif przekroju śruby wykonanej poprzez kucie. Struktura włókniasta. Przebieg włókien jest prawidłowy i świadczy o dwukrotnym wyboczeniu przy formowaniu kołnierza. Próbkę trawiona: stężony HCl, temperatura 80°C, czas 60 min

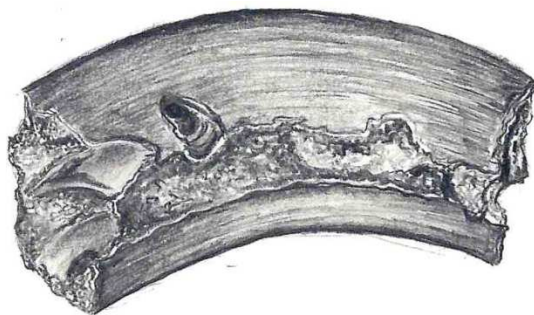


Rys. 1.4. Szkic przekroju złącza spawanego krzyżowego. Widoczne strefy wpływu ciepła przy spoinach pachwinowych oraz ślady korozji na styku blach. Głębokie trawienie: 20% roztwór wodny HNO_3 , czas ok. 10 s

W praktyce przemysłowej często stosowane są badania makroskopowe złączy spawanych, które wykonywane są podczas oceny sposobów spawania, podczas egzaminowania spawaczy i przy kontrolowaniu jakości wykonywanych spawów (PN-EN ISO 5817: 2014-05). Badania te umożliwiają wykazanie:

- poprzecznych wymiarów spoiny i błędów kształtu,
- wad w budowie spoin (rozlew lica, nawisy grani, brak przetopu, podtopienia krawędziach, wycieki, przyklejenia),
- nieciągłości metalu na przekroju spoiny i złącza (pęcherze gazowe, pęknięcia i zażużlenia).

Wyróżnia się dwa główne rodzaje złomów: rozdzielczy (kruchy) i poślizgowy (plastyczny). Przełom rozdzielczy (kruchy) powstaje bez oznak wcześniejszego płynięcia plastycznego metalu. Najczęściej występują one w żeliwach lub w stalach zahartowanych. Przełomy tego typu mogą być również poprzedzone niewielkimi odkształceniami plastycznymi i wtedy nazywane są przełomem rozdzielczym wiązkim. Występuje one często w stali hartowanej i odpuszczanej w niskiej temperaturze. Przełom poślizgowy (plastyczny) poprzedza wyraźne odkształcenie plastyczne. Występować może w niskowęglowych stalach wyżarzonych oraz w wielu metalach nieżelaznych i ich stopach.

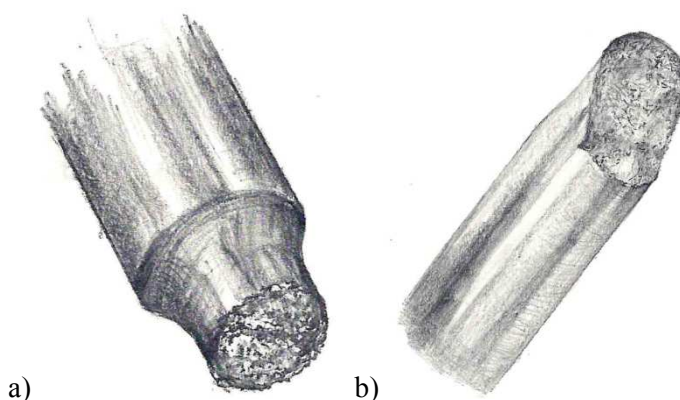


Rys. 1.5. Szkic przełamów odlewu żeliwnego. Widoczne pęcherze gazowe wewnętrzne i podpowierzchniowe oraz załużenia

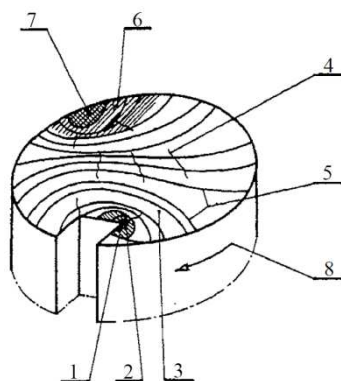


Rys. 1.6. Szkic freza palcowego wykonanego ze stali narzędziowej szybko tnącej. Droбноziarnista struktura i gładka powierzchnia przełomu świadczy o prawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplnej

Na próbce żeliwa szarego zwykłego poddanej rozciąganiu, bardzo dobrze jest widoczna struktura przełomu kruchego (rys. 1.7a). W elemencie tym nie powstało charakterystyczne przewężenie (szyjka), które powstaje podczas prób rozciągania próbek z materiałów plastycznych, jak stop aluminium z magnezem (rys. 1.7b).



Rys. 1.7. Szkice przełamów próbek po statycznej próbie rozciągania: a) żeliwo szare zwykłe, b) stop aluminium z magnezem



Rys. 1.8. Charakterystyczny obraz powierzchni przełomu zmęczeniowego: 1 – ognisko, 2 – strefa przyogniskowa, 3 – pierwotne uskoki, 4 – uskoki wtórne, 5 – linie zmęczeniowe, 6 – obszar przejściowy, 7 – strefa resztkowa, 8 – kierunek w jakim obracał się wał. Strefa zmęczeniowa obejmuje powierzchnię złomu z wyłączeniem strefy resztkowej [Huci-95]

Przełom, który powstaje pod wpływem działania obciążeń cyklicznie zmiennych określamy, jako zmęczeniowy (rys. 1.8). Na jego powierzchni wyróżnia się dwa obszary: ziarnisty i gładki. Na obszarze gładkim zauważalne są w tym miejscu charakterystyczne koncentrycznie ułożone linie, z widocznym centrum w miejscu gdzie jest początek postawania przełomu, określane też jako ognisko. Część muszlowa przełomu powstaje podczas rozwoju pęknięcia. Gładka część tego przełomu jest wynikiem tarcia powierzchni pęknięcia na skutek odkształceń elementu w trakcie kolejnych cykli zmiennych obciążeń. Część

ziarnista tego przełomu to końcowe pęknięcie elementu. Proces ten inicjowany jest mikropęknięciem w obszarze zwanym ogniskiem, tj. w miejscu lokalnego spiętrzenia naprężeń, na skutek działania mikrokarbu.

Płaszczyzna przełomu zmęczeniowego jest zwykle prostopadła do kierunku największego naprężenia głównego. Elementy obciążane naprężeniami zginającymi pękają prostopadle, a obciążane z momentem skręcającym pękają zazwyczaj pod kątem 45° . Podczas obserwacji powierzchni elementu lub przełomu powstałego podczas awarii, możliwe jest ustalenie:

- rodzaju obciążenia, które spowodowało zniszczenie,
- etapy procesu niszczenia (punkt początkowy i kierunek),
- co było pierwotną przyczyną awarii.

Badania makroskopowe mają pewne ograniczenia i wady. Przed badaniem zglądu wymagane jest odpowiednie przygotowanie powierzchni (szlifowanie). Na początku należy pobrać próbkę z elementu badanego. Próbki z badanego elementu należy wyciąć tak aby nie wpływać na ich wewnętrzną strukturę. Jeżeli jednak nie ma innej możliwości pobrania próbki, jak wycięcie z użyciem palnika acetylenowo-tlenowego, należy wziąć pod uwagę wpływ przegrzanej strefy i pozostawić naddatek, który następnie należy usunąć przez toczenie, frezowanie i szlifowanie. Są to najczęściej badania niszczące, jednak są jednymi z najprostszych metod badań makroskopowych. Gdy wymagane są informacje dotyczące występowania określonych pierwiastków, to do tego typu badań potrzebne są nam różnego rodzaju odczynników, które umożliwiają wykrycie wewnętrznych wad struktury oraz potrzebne jest doświadczenie w posługiwaniu się nimi.

1.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest poznanie metod badań makroskopowych, wykonanie zglądu makroskopowego, wykonanie próby Baumanna, trawienie odczynnikami do badań makroskopowych, interpretacja makrostruktury, obserwacja i interpretacja charakteru przełomów.

1.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Cel i zakres badań makroskopowych.
2. Przygotowanie próbek do badań makroskopowych.
3. Badania przekrojów (szlifów).
4. Działanie odczynników do głębokiego i powierzchniowego trawienia.
5. Próba Baumanna. Badania złączy spawanych.
6. Badania przełomów (ciągliwe, kruche, zmęczeniowe).

7. Wady półwyrobów i wyrobów gotowych (odlewy, walcowane, po obróbce cieplnej i mechanicznej).

1.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

1. Krótkie wprowadzenie na temat celu i sposobu przeprowadzania badań makroskopowych.
2. Odbitkę Baumanna wraz z opisem rozmieszczenia siarki w badanym przekroju.
3. Rysunek i opis makrostruktury oraz wad złącza spawanego.
4. Rysunek i opis powstawania struktury włóknistej.
5. Rysunki przełomów oraz wnioski dotyczące sposobu ich powstawania i właściwości materiału.
6. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

2. Badania metalograficzne mikroskopowe

2.1. Wprowadzenie

Przed przystąpieniem do mikroskopowych badań materiałowych, należy przeprowadzić obserwację makrostruktury, w celu zakwalifikowania charakterystycznych obszarów materiału, z których następnie będą prowadzone obserwacje, badania i analizy z użyciem mikroskopu.

W celu przygotowania zglądów, które będą przeznaczone do badań z użyciem mikroskopu świetlnego konieczne są następujące czynności:

- pobranie próbki (wybór miejsca wycięcia próbki dokonany na podstawie badań makroskopowych),
- zatopienie w żywicy (inkludowanie) – opcjonalnie,
- szlifowanie powierzchni na papierach lub płótnach ściernych,
- polerowanie na pastach diamentowych,
- polerowanie powierzchni mechaniczne z użyciem zawiesiny proszków polerskich lub elektrolityczne,
- trawienie powierzchni – ujawnienie mikrostruktury.

W zależności od kierunku usytuowania powierzchni zglądu względem osi próbki, która zwykle jest zależna od kierunku obróbki plastycznej w stopach przerobionych plastycznie, wyróżnia się następujące rodzaje zglądów:

- wzdłużne,
- poprzeczne,
- skośne, które stosowane jest przy badaniu cienkich warstw powierzchniowych np. galwanicznych, np. dla kąta $\alpha = 2^\circ 20'$ uzyskuje się poszerzenie 25:1, dla $\alpha = 5^\circ 40'$ poszerzenie 10:1.

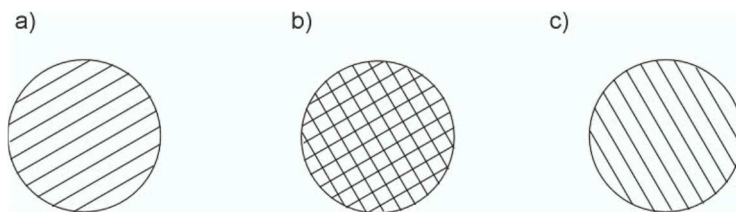
Próbki przed szlifowaniem zwykle są oprawiane, aby zabezpieczyć ich krawędzie przed niszczącym działaniem materiałów ściernych w trakcie szlifowania. Ma to szczególne znaczenie w przypadku przygotowania zglądów przeznaczonych do pomiarów mikrotwardości warstw wierzchnich. Stosowane są następujące metody do oprawy próbek:

- mechaniczne uchwyty – klamry, oprawki, sprężyny i zaciski,
- wytworzenie metalowych powłok (elektrolitycznie np. nikiel),
- zalewanie stopami o niskiej temperaturze topnienia (np. stop Wooda),
- inkludowanie w duroplastach (termo- lub chemoutwardzalnych) – najczęściej stosowana technika.

Próbki inkluduje się, gdy badane powierzchnie są małe na tyle, że występują problemy podczas ich szlifowania i polerowania. Poprzez zainkludowanie próbek w niskotopliwych polimerach lub stopach metali uzyskujemy większą powierzchnię do szlifowania oraz zwiększamy wysokość całej próbki. Drobne próbki umieszcza się także w uchwytach specjalnie wykonanych, składających się z dwóch metalowych płytek, ściąganych śrubami. Próbkę umieszcza się tak, aby powierzchnia, która ma być polerowana, była równo z odpowiednimi powierzchniami płytek zacisku. Aby chronić krawędzie próbki przed uszkodzeniem lub zaokrągleniem, a także w celu lepszego przylegania próbek o nieregularnych kształtach do zacisków, między próbką a płytkami zacisku umieszcza się cienkie blaszki z niklu lub miedzi.

Inkludowanie może być realizowane na:

- gorąco – w prasach do inkludowania pod ciśnieniem, w termoutwardzalnych żywicach (epoksydowe, fenolowe) lub żywicach termoplastycznych (akrylowe),
- zimno – w temperaturze normalnej, poprzez zalanie chemoutwardzalnymi żywicami (poliestrowe, akrylowe, epoksydowe). Inkludowane próbki umieszcza w specjalnych formach lub uchwytach.



Rys. 2.1. Ślady rys widoczne po szlifowaniu próbek na papierach ściernych

Na rys. 2.1a widoczne są ślady rys po szlifowaniu na papierze o ziarnistości 200, które są równoległe i ułożone w jednym kierunku. Ślady rys ułożone prostopadłe, które powstały podczas szlifowania na papierze o ziarnistości 320 – taki zgląd jest niewłaściwy, gdyż widoczne są jeszcze rysy, które powstały podczas szlifowania na poprzednim papierze (rys. 2.1b). Należy kontynuować szlifowanie, tak długo, aby widoczne były tylko jednokierunkowo ułożone rysy powstałe po szlifowaniu na papierze o ziarnistości 320. Taki widok powierzchni zglądu świadczy o prawidłowo zakończonym szlifowaniu na tym etapie (rys. 2.1c). Przy każdej zmianie ziarnistości papieru na drobniejszy należy zmieniać kierunek szlifowania o 90° . Przed wyborem kolejnego, drobniejszego papieru ściernego, stanowisko należy oczyścić, a próbkę opłukać pod bieżącą wodą i osuszyć w strumieniu sprężonego powietrza.

Chemiczne i elektrolityczne trawienie zgładów wykonuje się aby ujawnić strukturę na powierzchni próbki po polerowaniu. Stosuje się wodne lub alkoholowe roztwory kwasów, zasad lub soli. Zastosowanie, skład chemiczny, działanie, sposób trawienia oraz działanie odczynników do trawienia metali opisano w normach PN-H-04503:1961, PN-H-04512:1975.

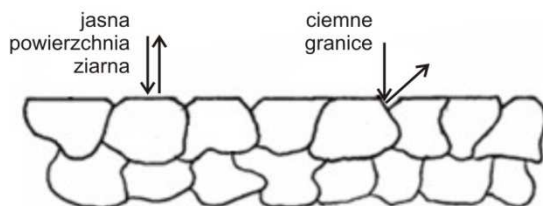
Proces trawienia zgładów polega na:

- oddziaływaniu odczynnika lokalnie, na granicach ziaren,
- zróżnicowanej szybkości rozpuszczania poszczególnych faz w badanym stopie oraz różnicy w rozpuszczalności ziaren tej samej fazy,
- różnym zabarwieniu poszczególnych faz w trakcie ich utleniania lub pokrywaniu powierzchni cienką warstwą faz lub związków chemicznych, tworzących się w trakcie trawienia.

Trawienie zgładu metalograficznego realizowane jest poprzez zanurzenie próbki w odczynniku chemicznym. Następnie próbkę płucze się w wodzie lub alkoholu, dokładnie osusza w strumieniu sprężonego powietrza. Przy trawieniu elektrolitycznym próbka jest anodą, a odczynnik jest elektrolitem. Bardzo często proces trawienia i polerowania elektrolitycznego wykonywany jest równocześnie.

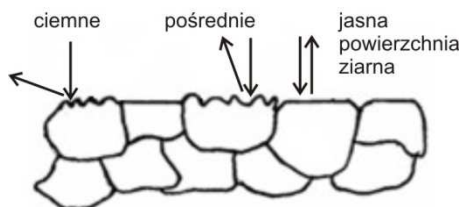
Do badań metalograficznych używa się mikroskopów metalograficznych. Na podstawie obserwacji mikroskopowych możliwe jest:

- określenie kształtu i wielkości ziaren, z których zbudowane są metale lub stopy,
- wykrycie wewnętrznych wad materiału oraz wtrąceń niemetalicznych,
- identyfikowanie poszczególnych faz i składników strukturalnych, badanie ich morfologii, ilości oraz wymiarów i rozmieszczenia,
- rozpoznanie jaką zastosowano technologię wytwarzania wyrobów, np. przeróbka plastyczna, odlewnictwo, czy obróbka cieplna lub cieplno-chemiczna.



Rys. 2.2. Schemat rozpraszania i odbijania promieni świetlnych na granicach ziaren i na ich powierzchni [Rudn-98]

Odczynniki do trawienia działają głównie na granicach ziaren. Światło padając ulega rozproszeniu na granicach ziaren, dlatego pod mikroskopem widoczne są one jako linie ciemne (rysunek 2.2). W jednofazowych stopach różne ziarna wytrawiają się słabiej lub silniej, zależy to od ich orientacji krystalograficznej względem powierzchni zglądu. Silniej wytrawione ziarna bardziej rozpraszają padające światło – wydają się przez to ciemniejsze (rysunek 2.3). W przypadku, gdy próbka składa się z kilku faz, zwykle następuje silniejsze wytrawienie jednej z nich względem drugiej, co pozwala na ich rozróżnianie pod mikroskopem.



Rys. 2.3. Schemat rozpraszania i odbijania promieni świetlnych na powierzchni faz nadtrawiających się po trawieniu odczynnikami lub elektrolitami [Rudn-98]

Metalograficzne badania mikroskopowe prowadzone w celu naukowym pozwalają na:

- określenie stanu materiału oraz przemian fazowych, które zachodzą w materiale pod wpływem czynników zewnętrznych i wewnętrznych,
- przybliżoną identyfikację materiału,
- ocenę mechanizmu niszczenia.

Przemysłowe badania metalograficzne mikroskopowe prowadzone są w celu:

- identyfikacji materiałów i ich stanu po zabiegach technologicznych: obróbce cieplnej i cieplno-chemicznej, przeróbce plastycznej, spawaniu,
- oceny jakości materiału, np. poprzez: określenie wielkości ziarna, rozmiarów wydzielen grafitu w żeliwach, rozmiarów i rozmieszczenia wtrąceń niemetalicznych, jednorodności mikrostruktury,
- oceny wpływu zmiany parametrów wytwarzania wyrobu na mikrostrukturę materiału,
- określenia przyczyn uszkodzenia elementu.

Gotowe zglądy metalograficzne przechowywane są w specjalnych naczyniach – eksykatorach. Dla lepszej szczelności brzegi naczyń oraz pokryw

smarowane są wazeliną techniczną. W naczyniu umieszcza się substancję o właściwościach higroskopijnych np. żel krzemionkowy. Próbkę umieszczaną w eksykatorze na perforowanym mostku ceramicznym lub metalowym nad materiałem higroskopijnym. Dokumentację fotograficzną obrazów metalograficznych najlepiej sporządzić bezpośrednio ze świeżo wypolerowanych i wytrawionych zgładów.

2.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z techniką badań mikroskopowych. Zapoznanie się z obsługą mikroskopu metalograficznego, oraz metodyką wykonania zgładów do badań metalograficznych mikroskopowych.

2.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

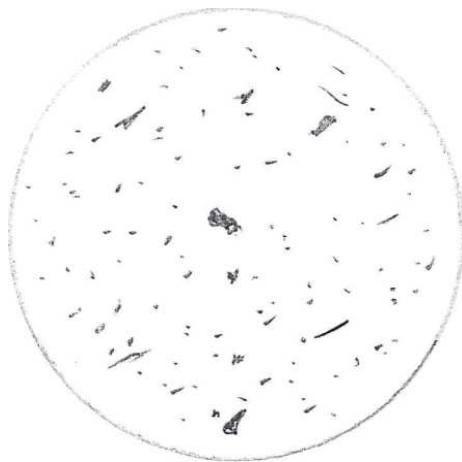
1. Cel badań metalograficznych mikroskopowych.
2. Zasady pobierania próbek do badań mikroskopowych.
3. Technika przygotowania próbki (zgładu metalograficznego).
4. Mechanizm działania odczynników do wytrawiania mikrostruktury.
5. Budowa mikroskopu metalograficznego. Schemat powstania obrazu.
6. Powiększenie mikroskopu. Zdolność rozdzielcza mikroskopu.

2.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

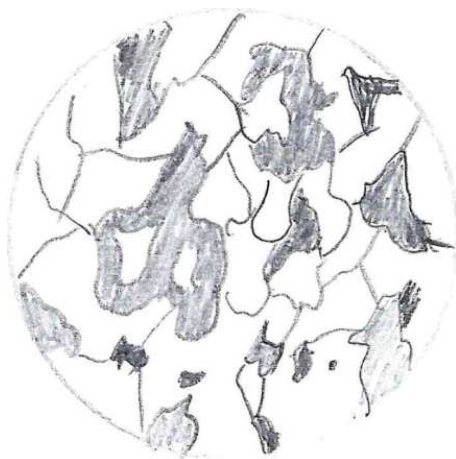
1. Wprowadzenie na temat badań metalograficznych mikroskopowych.
2. Opis przebiegu przygotowania próbki (zgładu).
3. Rysunek i opis obrazu zgładu nietrawionego.
4. Rysunek i opis struktury zgładu trawionego.
5. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

2.2.3. Obrazy mikrostruktury

Na rysunkach 2.4 i 2.5 przedstawiono obrazy mikrostruktury stali konstrukcyjnej. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.



Rys. 2.4. Stal konstrukcyjna niestopowa, niskowęglowa. Widoczne wtrącenia niemetaliczne. Zgład nietrawiony. Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 2.5. Stal konstrukcyjna niestopowa, niskowęglowa. Struktura ferrytyczno-perlityczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$

3. Pomiary twardości

3.1. Wprowadzenie

Twardość jest to właściwość ciał stałych definiowana w technice, jako opór stawiany przez badany materiał przy działaniu na niego innym, twardszym materiałem (wgłębnikiem) z określoną siłą. Definicja ta jest bardzo ogólna, nie określa, bowiem jednoznacznie warunków działania wgłębnika, kształtu, wymiarów i materiału, z którego jest on wykonany, wartości i rodzaju siły działającej oraz sposobu pomiaru oporu. Twardość jest właściwością umowną, a określenie szczegółowe tych warunków jest przyczyną powstania wielu metod pomiaru.

Rezultaty badań twardości można wykorzystać do następujących celów:

- materiały podobne można skatalogować według twardości,
- można sprawdzać jakość przeprowadzonej obróbki cieplnej lub obróbki plastycznej na zimno,
- wyznaczenie zależności między twardością, a wytrzymałością na rozciąganie.

Twardość, podobnie jak wytrzymałość, zależy od charakteru wiązań, typu struktury oraz mikrostruktury materiału. Dla wielu materiałów, zwłaszcza metali, twardość jest proporcjonalna do wytrzymałości na rozciąganie. Ze względu na łatwość i szybkość oraz szczególnie silną zależność od mikrostruktury, pomiary twardości są powszechnie stosowane w przemyśle do kontroli m.in. zabiegów obróbki cieplnej i plastycznej, a także do oceny stanu technologicznego materiału.

Metody pomiarów twardości można podzielić na:

- próby statyczne, w których opór jaki jest stawiany przez materiał pod działaniem obciążenia statycznego wynika z jego odkształcenia plastycznego,
- próby dynamiczne, podczas których opór materiału wywołany działaniem uderowego obciążenia ma związek z jego odkształceniem sprężystym lub plastycznym,
- próby zarysowania, w których opór materiału powstaje w wyniku jego zarysowania,
- próby twardości, o których decyduje odporność materiału na zużycie ścierne.

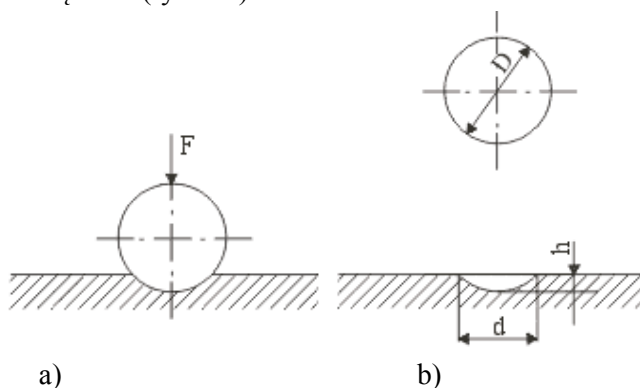
Największe znaczenie w praktyce mają statyczne próby pomiaru twardości z użyciem metod:

- Brinella (HB),
- Vickersa (HV),
- Rockwella (np. HRC, HRB),
- Knoop (HK),
- Chruszczowa-Bierkowicza (HCH),
- Grodzińskiego (HG).

Do metod dynamicznych pomiaru twardości należą m.in.:

- metoda Shorea,
- metoda młotka Poldi.

Pomiar twardości metali metodą Brinella (PN-EN ISO 6506-1) realizowany jest poprzez wciskanie w określonym czasie w powierzchnię badanej próbki zahartowanej kulki stalowej lub kulki wykonanej z węgla spiekanego, pod wpływem obciążenia działającego prostopadle do jej powierzchni. Twardość w tej metodzie określana jest na podstawie pomiarów średnicy powstałego odcisku d po odciążeniu (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Schemat pomiaru twardości metodą Brinella: a) badany materiał pod obciążeniem, b) badany materiał po odciążeniu. D – średnica kulki, d – średnica powstałego odcisku, F – przyłożona siła, h – głębokość powstałego odcisku

Twardość Brinella HB jest obliczana z ilorazu siły obciążającej do pola powierzchni powstałego odcisku, z następującej zależności:

$$HB = 0,102 \times \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

gdzie: F – siła obciążająca [N], S – pole powierzchni odcisku [mm^2], które obliczamy z zależności:

$$S = \frac{\pi \times D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \quad (3.2)$$

gdzie: D – średnica kulki [mm], d – średnica odcisku [mm]

Ostatecznie twardość HB określamy z zależności:

$$HB = \frac{0,204 \times F}{\pi \times D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.3)$$

Obciążenie F jest dobierane na podstawie zależności: $F = 9,807 \text{ KD}^2$, gdzie: K to współczynnik obciążenia wynoszący 1, 2,5, 5, 10, 15, 30. Wartość współczynnika K dobierana powinna być tak, by średnica czaszy kulistej powstałego odcisku d była w zakresie $(0,25 \div 0,6) \times D$. Wyniki pomiarów twardości można porównywać między sobą, gdy stosowano te same wartości współczynnika K .

Oznaczenie twardości Brinella składa się z ciągu znaków cyfrowo-literowych, zawiera:

- liczbową wartość twardości (trzy cyfry znaczące),
- symbole HB lub HB_w (w – dla kulek z węglików spiekanych),
- indeks wskazujący przyjęte warunki pomiaru, który zawiera informacje o: średnicy kulki w mm, wartość obciążającej siły w kG, czas działania siły obciążającej w sekundach (jeśli jest inny niż 10÷15 s).

Przykładowe oznaczenie twardości Brinella: 320 HB_{W10/3000/20}.

Zalety pomiarów twardości metodą Brinella:

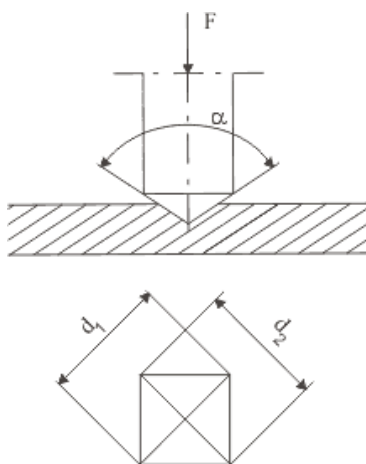
- dla materiałów ciągliwych istnieje zależność twardości Brinella od wytrzymałości na rozciąganie ($HB \approx 3 \times R_m$),
- duża powierzchnia odcisku, która pozwala na stosowanie tej metody do pomiaru twardości materiałów o strukturze niejednorodnej (wielofazowej),
- wykorzystanie tylko jednej skali do określenia twardości,
- dobra powtarzalność wyników.

Wady metody Brinella:

- nie można stosować do pomiarów twardości materiałów twardych, drobnych elementów oraz cienkich utwardzonych warstw i elementów o niepłaskich powierzchniach,
- pomiar nie jest odczytywany bezpośrednio – mikroskop do pomiaru średnicy odcisku oraz dalsze odczyt twardości z użyciem tablic,
- wyniki pomiaru twardości zależą od wartości użytego obciążenia,
- powstaje znacznych rozmiarów uszkodzenie powierzchni.

Metoda Vickersa (PN-EN ISO 6507-1) jest najbardziej uniwersalną i szeroko stosowaną metodą do pomiaru twardości. Może być stosowana do pomiarów twardości materiałów twardych i miękkich, możliwy jest pomiar

twardości bardzo małych elementów oraz cienkich warstw powierzchniowych. W metodzie tej stosowany jest wgłębnik diamentowy (ostrosłup o podstawie kwadratowej o kącie pomiędzy przeciwległymi ścianami $\alpha = 136^\circ$). Wgłębnik ten wciskany jest prostopadłe w powierzchnię próbki siłą obciążającą F , przez określony czas t . Po odciążeniu mierzona jest długość przekątnych odcisku, który powstał na powierzchni badanej próbki (rys. 3.2). Pomiar twardości metalu metodą Vickersa realizowany przy zastosowaniu obciążeń z zakresu od 1,961 do 980,7 N, co uwzględniane jest w oznaczeniu, odpowiednio $HV_{0,2}$ do HV_{100} .



Rys. 3.2. Schemat pomiaru twardości metodą Vickersa. F – siła obciążająca, d_1 i d_2 – długości przekątnych powstałego odcisku, α – kąt pomiędzy przeciwległymi ścianami wgłębnika

Twardość Vickersa obliczamy z zależności:

$$HV = 0,102 \times \frac{F}{S} \quad (3.4)$$

gdzie: F – wartość obciążenia [N], S – pole powierzchni odcisku [mm^2].

$$S = \frac{d^2}{2 \times \sin \frac{136^\circ}{2}} \quad (3.5)$$

gdzie: d – średnia arytmetyczna długości dwóch przekątnych.

Ostatecznie twardość HV określamy z zależności:

$$HV = \frac{0,204 \times F \times \sin 68^\circ}{d^2} = 0,18915 \times \frac{F}{d^2} \quad (3.6)$$

W zapisie twardości w metodzie Vickersa zawarte są:

- liczbową wartość, która określa twardość,
- oznaczenie HV,

- liczba określająca zastosowane obciążenie (w kG)
- czas działającej siły jeśli był inny niż $10 \div 15$ s.

Przykład oznaczenia twardości Vickersa: 580 HV_{20/30}.

Pomiary twardości przeprowadzane są w temperaturze otoczenia, jeśli nie było innych ustaleń. Jeżeli w zaleceniach norm przedmiotowych nie podano inaczej, należy wykonywać przynajmniej trzy odciski, do wyliczenia wartości średniej arytmetycznej twardości badanego metalu. Wgłębnik podczas wykonywania odcisku powoduje odkształcenie plastyczne i zmianę własności materiału wokół punktu pomiarowego. Aby uniknąć błędnych pomiarów, normy nakazują zachowanie minimalnej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi. W przypadku stali i miedzi, odciski powinny być oddalone od siebie, co najmniej o 3 długości przekątnej (średnicy) odcisku ($\geq 3 \times d$), natomiast w przypadku bardzo miękkich materiałów (ołów, cynk, aluminium i cyna) odległość ta powinna wynosić, co najmniej 6 długości przekątnej odcisku ($\geq 6 \times d$).

Zalety pomiarów twardości metodą Vickersa:

- duża porównywalność do metody Brinella (w zakresie do 300 jednostek HB metody są ze sobą zgodne; natomiast powyżej należy stosować zależność $HB = 0,95 \times HV$),
- jest przybliżona zależność twardości HV od granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m ($HV \approx 3 \times R_m$),
- można stosować tę metodę zarówno do badania materiałów miękkich, jak i bardzo twardych,
- jedna skala dla całego zakresu twardości,
- możliwość badania zarówno cienkich warstw przypowierzchniowych, jak i dużych elementów,
- mała głębokość odcisków,
- zmiany w ustawieniu nie wpływają na wynik pomiaru,
- długości przekątnych odczytywane są z dużą dokładnością,
- przy zastosowaniu większych wartości obciążeń wyniki pomiarów twardości nie zależą od użytego obciążenia.

Wady metody Vickers'a:

- ze względu na złożoną konstrukcję twardościomierza wymagana jest fachowa jego obsługa,
- długi czas pomiaru,
- trudny pomiar twardości materiałów o niejednorodnej budowie,
- gładkość powierzchni ma duży wpływ na wyniki pomiarów (powierzchnię mierzonych przedmiotów należy dokładnie przygotować,

powinna być szlifowana na bardzo drobnych papierach, często również polerowana).

Przy znacznej liczbie pomiarów masowych, przy badaniu twardości stali konstrukcyjnych i narzędziowych po obróbce cieplnej, często stosowana jest metoda Rockwella. Dzięki bezpośredniemu odczytowi wyników, na czujniku zegarowym lub wyświetlaczu przyrządu, możliwa jest duża szybkość pomiarów. Pomiar twardości metali metodą Rockwella (PN-EN ISO 6508-1) realizowany jest poprzez dwustopniowe wciskanie wgłębnika (wstępnie siłą F_0 , a następnie siłą główną F_1) w powierzchnię badanej próbki według określonych normami warunkami obciążania. Wynik podawany jest w jednostkach twardości HR... odczytywany z odpowiednio wyskalowanego czujnika.

W metodzie tej stosuje się trzy wartości siły obciążającej (588,6 N, 981 N i 1471,5 N) oraz dwa rodzaje wgłębników – stożek diamentowy o kącie rozwarcia 120° i promieniu zaokrąglenia $r = 0,2$ mm oraz hartowane kulki stalowe o średnicy $1/16''$ (1,588 mm) lub o średnicy $1/8''$ (3,175 mm). W związku z powyższym używana jest znaczna liczba skal, przykładowo:

- skale: A, C, D, N – stożek diamentowy o kącie rozwarcia 120° i promieniu zaokrąglenia $r = 0,2$ mm,
- skale: B, F, G, T – kulka stalowa o średnicy $1/16''$ (1,588 mm),
- skale: E, H, K – kulka stalowa o średnicy $1/8''$ (3,175 mm).

Niezależnie od zastosowanej skali, wgłębник wstępnie zagłębia się w badany materiał na głębokość h_0 pod wpływem obciążenia wstępnego (F_0). Obciążenie wstępne stosowane jest aby wyeliminować błędy mogące wynikać z niedokładnego przylegania wgłębnika nieobciążonego do powierzchni metalu oraz ze sprężystego odkształcenia. Po dodaniu głównego obciążenia wgłębник jest wciskany z siłą $F_0 + F_1$ i zagłębia się do głębokości h . Po czasie gdy zakończy się odkształcenie plastyczne wgłębник odejmowane jest obciążenie główne i pozostaje tylko pod obciążeniem wstępnym F_0 . Po odjęciu głównego obciążenia F_1 , z powodu sprężystości badanego materiału zmniejsza się trwałe zagłębienie wgłębnika i osiąga wartość e . To trwałe zagłębienie e przyjmuje się do określenia twardości Rockwella na podstawie wzoru:

$$HR = (K - e) / C \quad (3.7)$$

gdzie: K – stała wartość, która wynosi: 0,2 mm gdy używany jest stożek diamentowy oraz 0,26 mm przy użyciu kulki, e – trwałe zagłębienie, C – jednostka odczytowa wynosząca 0,002 mm. Wartość twardości tak wyznaczona, to wielkość niemianowana.

W oznaczeniu twardości w metodzie Rockwella podaje się:

- liczbę określającą wartość twardości,

- znak HR oraz odpowiedni symbol skali (np. A, B, C, D).

Przykłady oznaczeń twardości: 32 HRC – gdy zastosowano stożek diamentowy o obciążenie 1471,5 N lub 92 HRB gdy zastosowano kulkę o średnicy 1/16" i obciążenie 981 N.

Zalety pomiarów twardości metodą Rockwella:

- możliwe jest badanie utwardzonych wyrobów oraz niektórych utwardzonych warstw,
- łatwość i duża szybkość pomiaru,
- obsługa twardościomierza jest prosta,
- możliwość odczytu twardości bezpośrednio na twardościomierzu (nie jest konieczne stosowanie dodatkowych tablic),
- średnica odcisków jest niewielka,
- możliwe jest stosowanie go do zautomatyzowania pomiarów.

Wady metody Rockwella:

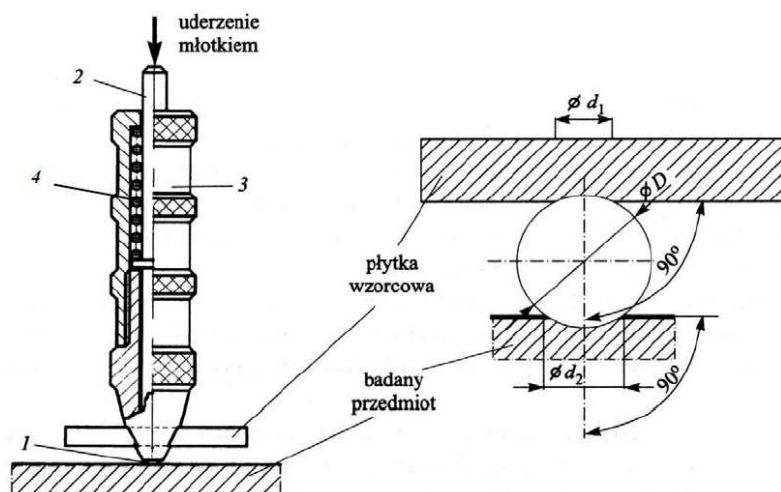
- niepoprawne ustawienie przedmiotu ma wpływ na wyniki pomiarów,
- zanieczyszczenia śruby podnośnej i podstawek, stolika przedmiotowego i kształt badanego wyrobu wpływać mogą na wynik pomiaru,
- niemożliwy jest pomiar twardości przedmiotów o małej grubości oraz cienkich warstw (np. po nawęglaniu lub azotowaniu),
- duża liczba skal twardości oraz ich nierównomierność utrudnia porównywanie między nimi oraz z wynikami uzyskiwanymi innymi metodami.

Spośród dynamicznych metod pomiaru twardości metali najbardziej rozpowszechniona jest metoda opracowana w hucie Poldi w Czechach. Stosowana głównie przy pomiarze twardości dużych, trudnych do przeniesienia elementów. Młotek Poldi, to korpus, w którym umieszczony jest sworzeń, który oparty jest o wzorcową płytkę (rys. 3.3). Płytką wzorcową po drugiej stronie oparta jest o kulkę stalową o średnicy 10 mm. Po uderzeniu młotkiem (o masie 500 g) w sworzeń dochodzi do równoczesnego wciśnięcia kulki w powierzchnię płytki wzorcowej (o znanej twardości HB) oraz w powierzchnię elementu badanego. Następnie mierzona jest średnica odcisków: D_{wz} na wzorcowej płytce oraz d_{pr} na powierzchni badanego materiału.

Wynik pomiaru twardości, w skali Brinella, wyznaczany jest ze wzoru w postaci:

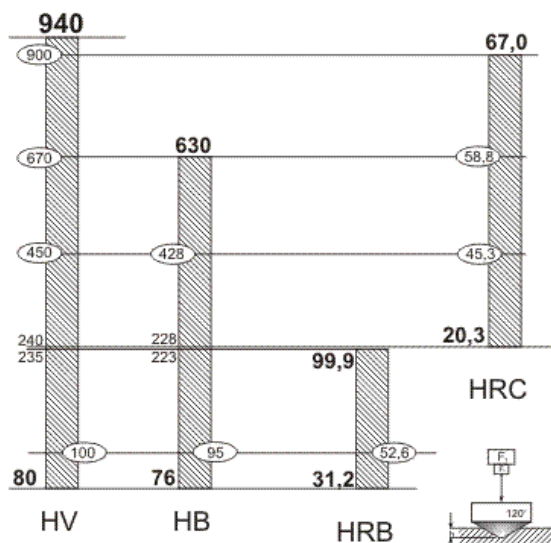
$$HB_{pr} = \frac{D_k - \sqrt{100 - D_{wz}^2}}{D_k - \sqrt{100 - d_{pr}^2}} \times HB_{wz} \quad (3.8)$$

gdzie: HB_{pr} – twardość badanego materiału, otrzymana w skali Brinella HB, D_k – średnica kulki twardościomierza [mm], D_{wz} – średnica odcisku na wzorcu [mm], d_{pr} – średnica odcisku na badanej próbce [mm], HB_{wz} – twardość wzorca w skali Brinella HB.



Rys. 3.3. Schemat budowa młotka Poldi oraz zasada pomiaru twardości: 1 – stalowa kulka oparta o badany przedmiot, 2 – sworzeń, 3 – korpus młotka, 4 – sprężyna [Huci-95]

Często zachodzi potrzeba przeliczenia wyników pomiarów twardości uzyskanych jedną z metod na pozostałe. Do tego celu stosowane są tablice oraz diagramy, które na to pozwalają. Należy jednak pamiętać, że mają one jedynie znaczenie orientacyjne. Na rys. 3.4 przedstawiono wykres umożliwiający porównanie twardości materiałów dla trzech metod.



Rys. 3.3. Porównanie wyników pomiarów twardości metodami Vickersa (HV), Brinella HB oraz Rockwella (HRB, HRC) [Huci-95]

3.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest poznanie pojęcia twardości oraz zapoznanie się ze statycznymi i dynamicznymi metodami pomiarów twardości wybranych metali i stopów metali.

3.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Definicja twardości. Statyczne i dynamiczne metody pomiaru twardości metali.
2. Metoda Brinella – zakres stosowania, zasady i warunki pomiarów (PN-EN ISO 6506-1).
3. Metoda Vickersa – zakres stosowania, zasady i warunki pomiarów (PN-EN ISO 6507-1).
4. Metoda Rockwella – zakres stosowania, zasady i warunki pomiarów (PN-EN ISO 6508-1).
5. Metoda Shorea – zakres stosowania, zasady i warunki pomiarów.
6. Metoda Poldi – zakres stosowania, zasady i warunki pomiarów
7. Porównanie twardości Brinell'a z wytrzymałością na rozciąganie oraz porównywanie twardości mierzonych różnymi metodami (PN-H-04357:1993, ISO 4964:1984).

3.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

1. Krótkie wprowadzenie na temat celu badań twardości metali.
2. Opisy zastosowanych metod pomiaru twardości.
3. Tabele pomiarowe (tabela 3.1).
4. Wnioski dotyczące zgodności wyników pomiarów z wartościami spotykanymi w literaturze dla badanych materiałów oraz warunków wykonania pomiarów.

Tabela 3.1. Zestawienie wyników badań

Materiał	Twardość				
	HRB/HRC				HB
	1	2	3	Wartość średnia	

4. Zmiany właściwości i struktury zachodzące w metalach podczas odkształcenia plastycznego

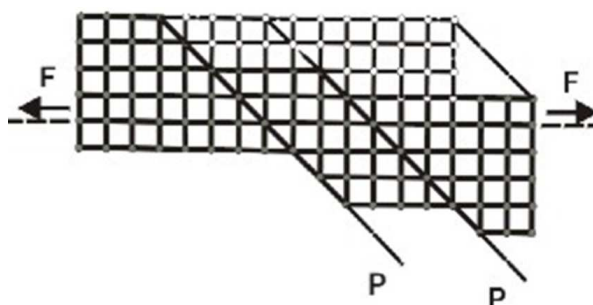
4.1. Wprowadzenie

4.1.1. Mechanizm odkształcenia plastycznego

Obciążenie przyłożone do metalu wywołuje jego odkształcenie. Odkształcenie może być sprężyste – znikające po usunięciu obciążenia, lub plastyczne (trwałe) – pozostające po odciążeniu. W skali atomowej odkształcenie plastyczne powstaje na skutek zrywania wiązań między sąsiednimi atomami i tworzenia ich z nowymi sąsiednimi atomami. Odkształcenie plastyczne zachodzi głównie w drodze poślizgu oraz bliźniakowania.

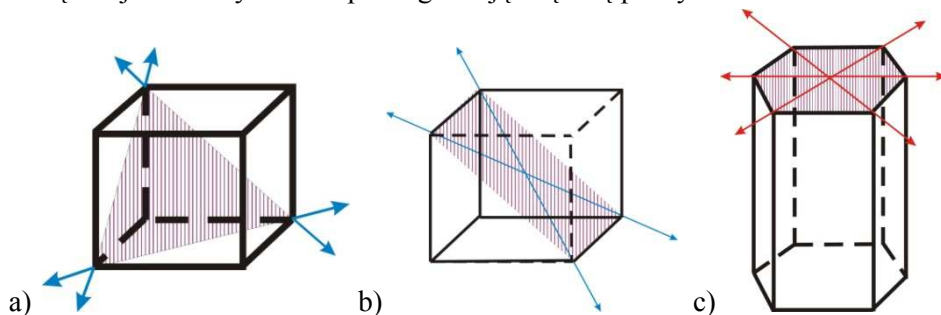
Zgniotem określamy zmiany zachodzące w strukturze i właściwościach metali lub stopów w wyniku odkształcenia plastycznego na zimno.

Odkształcenie przez poślizg polega na przemieszczaniu się jednej części kryształu względem drugiej wzdłuż płaszczyzn poślizgu (P) na skutek ruchu dyslokacji zgodnie z kierunkiem poślizgu – rysunek 4.1. Budowa krystaliczna w obu częściach nie zmienia się. Płaszczyzny krystaliczne najgęściej obsadzone atomami są określane jako płaszczyzny łatwych poślizgów, w których metal daje najmniejszy opór przy odkształceniu. Dyslokacje, jako defekty sieci wywołujące zaburzenie w periodycznym układzie atomów powodują, że poślizg jest ułatwiony i zachodzi przy znacznie mniejszym naprężeniu stycznym niż teoretyczne. Warunkiem zajścia poślizgu jest, aby naprężenie styczne, które działa w określonej płaszczyźnie i kierunku poślizgu było wyższe od wartości krytycznego naprężenia stycznego.



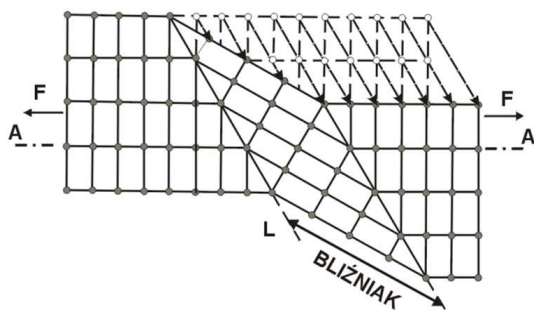
Rys. 4.1. Przesunięcie sieci przestrzennych podczas poślizgu [Rudn-98]

Metale o strukturze sieci A1 mają 4 płaszczyzny, a w każdej 3 kierunki, czyli 12 systemów poślizgu. Metale o strukturze sieci A3 mają przeważnie 1 płaszczyznę o 3 kierunkach, czyli 3 systemy poślizgów – rysunek 4.2. Metale o większej liczbie systemów poślizgu mają większą plastyczność.



Rys. 4.2. Przykłady płaszczyzn i kierunków poślizgu w sieci: a) A1 - $\{111\}$, b) A2 - $\{110\}$, c) A3 (0001) [Prow-94]

Poślizg może być związany również z ruchem dyslokacji śrubowych, polegającym na przemieszczaniu się linii dyslokacji śrubowej do wnętrza kryształu, w kierunku prostopadłym do działającego naprężenia stycznego. W efekcie dyslokacji śrubowej powstaje specyficzne zniekształcenie sieci kryształu, które polega na tym, że płaszczyzny atomowe prostopadłe do linii tej dyslokacji tworzą powierzchnię śrubową, a dyslokacja staje się jej osią. Dyslokacje śrubowe mogą ulegać przemieszczeniu przez poślizg po każdej płaszczyźnie, w których znajdują się dyslokacje, lecz nie mogą się wspinać.



Rys. 4.3. Schemat bliźniakowania [Rudn-98]

Bliźniakowanie jest przemieszczaniem części kryształu, którego efekt krystalograficzny jest równoważny obrotowi – rysunek 4.3. W części kryształu przemieszczonej (bliźniaku) dochodzi do przesunięć atomów położonych w tej

samej płaszczyźnie proporcjonalne do ich odległości od płaszczyzny (L) określonej jako płaszczyzna bliźniakowania. W efekcie te dwie części kryształu występują w lustrzanym odbiciu, symetryczne do płaszczyzny bliźniakowania. Bliźniakowanie zachodzi w określonych płaszczyznach i kierunkach, zwykle gęsto obsadzonych atomami, co jest charakterystyczne dla danej struktury krystalicznej. Także kąt skręcania części kryształu względem drugiej ma stałą wartość dla danej struktury. Aby odkształcenie przez bliźniakowanie zaszło konieczne jest działanie naprężenia stycznego, które będzie równoległe do kierunku zbliźniaczenia, o wielkości wymaganej do powstania zarodków bliźniaków. Zarodki bliźniaków powstają w miejscach o dużym nagromadzeniu energii odkształcenia na skutek uprzedniego odkształcenia przez poślizg. Bliźniakowaniu sprzyja szybkie odkształcenie i zawartość w metalu dodatków pierwiastków stopowych.

Zgniot na zimno mierzy się najczęściej zmianą przekroju poprzecznego (F) części odkształconych. Czasem zgniot można mierzyć zmianą głównego wymiaru przedmiotu, np. długości (l) podczas rozciągania metalu lub zmianą wysokości (h) przy ściskaniu:

$$Z = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100 [\%] \quad (4.1)$$

$$Z = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 [\%] \quad (4.2)$$

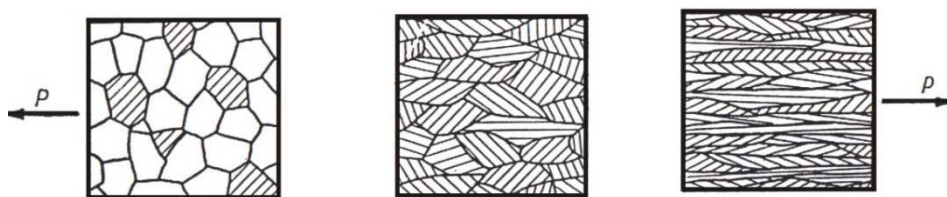
$$Z = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100 [\%] \quad (4.3)$$

gdzie: Z – oznacza stopień zgniotu w procentach, F_0 – pole powierzchni przekroju przed odkształceniem, F – pole powierzchni przekroju po odkształceniu, l_0 – długość początkowa rozciąganej próbki, l – długość końcowa po zgniocie próbki rozciąganej, h_0 – wysokość początkowa ściskanej próbki, h – wysokość końcowa po zgniocie próbki ściskanej.

4.1.2. Wpływ odkształcenia plastycznego na strukturę i właściwości metalu

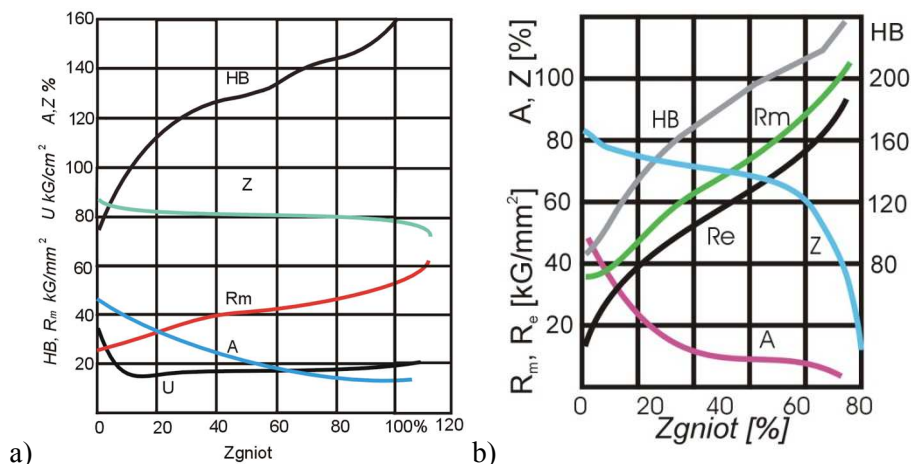
Zmiany struktury zależą od stopnia odkształcenia. Przy małych stopniach odkształcenia w poszczególnych ziarnach w zależności od mechanizmu odkształcenia można zaobserwować linie poślizgu lub linie bliźniakowania. Przy dużych stopniach odkształcenia dość znacznym odkształceniom ulegają poszczególne ziarna. Ziarna są wydłużone w kierunku zgodnym z kierunkiem odkształcenia, posiadają kształt wrzecionowaty i powstaje tekstura zgniotu – rysunek 4.4. W obrębie sieci krystalicznej pojedynczych ziaren także zachodzą

istotne zmiany. Wzrasta znacznie gęstość dyslokacji, a sieć krystaliczna ulega zniekształceniu.



Rys. 4.4. Schematy zmian struktury w polikrystalicznym metalu zachodzących w wyniku wzrastającego zgniotu przy rozciąganiu [Wend-76]

Umocnienie metalu po zgnioście polega na powstawaniu przeszkód na drodze przemieszczania się dyslokacji. Hamowanie przesuwania się dyslokacji występuje w wyniku rosnącej ilości dyslokacji utwardzonych oraz rosnącego oddziaływania na siebie dyslokacji, stwarzających wokół siebie stan naprężeń w sieci i w zależności od swego wzajemnego ułożenia hamują ruch dyslokacji. Gęstość dyslokacji w metalu po zgnioście rośnie w stosunku do stanu materiału wyżarzzonego od $10^6/\text{cm}^2$ do $10^{12}/\text{cm}^2$. Umocnienie objawia się wzrostem twardości HB, wytrzymałości na rozciąganie R_m , granicy plastyczności R_e , a obniżeniem właściwości plastycznych (wydłużenie A i przewężenie Z) oraz obniżeniem udarności U – rysunek 4.5a,b.



Rys. 4.5. Zmiana właściwości w zależności od stopnia zgniotu: a) czystego żelaza, b) mosiądzu CuZn35 [Wend-76]

Przy wzroście stopnia zgniotu zmniejsza się również przewodnictwo elektryczne i przenikalność magnetyczna, natomiast magnetyzm szczątkowy i siła koercji rosną. Zgnieciony metal ma większą objętość właściwą, a mniejszy ciężar właściwy. Zwiększa się także rozpuszczalność w kwasach i maleje odporność korozyjna. Najwyraźniej zmieniają się jednak właściwości mechaniczne.

Odształcenie plastyczne metali stosowane jest do nadawania im wymaganych kształtów i wymiarów bez naruszenia spójności pod działaniem nacisku narzędzi odkształcających. W miarę wzrostu odkształcenia plastycznego metal umacnia się, czyli przez zmianę budowy wewnętrznej zwiększa się opór odkształcenia przy równoczesnym zmniejszaniu właściwości plastycznych. Aby zachodził proces odkształcenia, muszą być przyłożone coraz większe naprężenia potrzebne do odkształcenia, zaś przy dalszym wzroście naprężeń w pewnej chwili następuje przekroczenie granicy spójności i przełom metalu.

4.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zmianami właściwości mechanicznych i struktury zachodzącymi w metalach podczas odkształcenia plastycznego na zimno.

4.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Przebieg odkształcenia plastycznego w metalach (odkształcenie monokryształu, odkształcenie materiału polikrystalicznego).
2. Mechanizm odkształcenia plastycznego w metalach w świetle teorii dyslokacji.
3. Zmiany właściwości i struktury zachodzące przy odkształceniu plastycznym (umocnienie, anizotropia właściwości, tekstura zgniotu).
6. Pomiar twardości metodą Rockwella, Brinella i Vickersa.

4.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

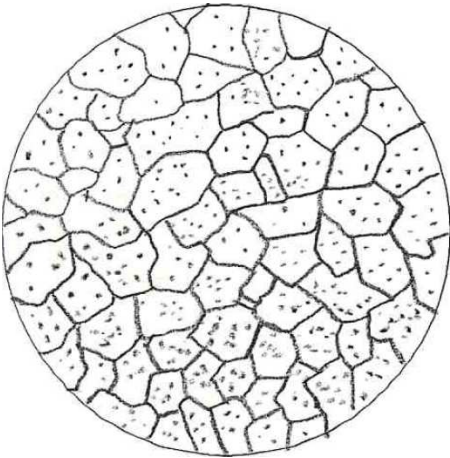
1. Wpływ zgniotu na właściwości mechaniczne żelaza.
3. Tabela wyników pomiarów twardości próbek: wyjściowej i po zgniciu (tabela 4.1).
4. Rysunki oraz opis struktury żelaza ARMCO przed i po zgniciu.
5. Analiza wyników i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

Tabela 4.1. Wyniki pomiarów

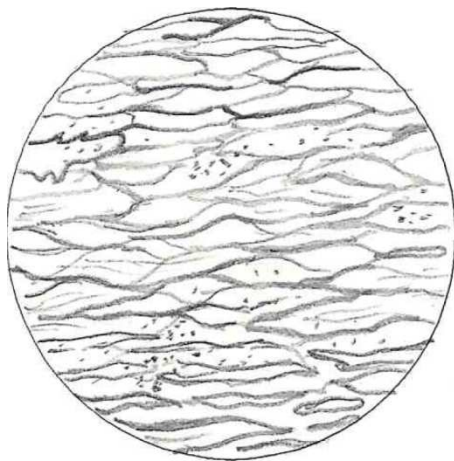
Stan materiału	Twardość wg metody Rockwella (skala HRB)					Wysokość próbki h_0 i h , mm	
	Nr pom.	1	2	3	średnia		
Przed zgniotem						h_0	mm
Po zgnioście						h	mm

4.2.3. Obrazy mikrostruktury

Na rysunkach 4.6 i 4.7 przedstawiono przykładowe obrazy mikrostruktury żelaza ARMCO przed i po zgnioście. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.



Rys. 4.6. Żelazo ARMCO – stan wyjściowy. Struktura: ziarna ferrytu równoosiowe, wydzielania cementytu trzeciorzędowego na granicach ziaren ferrytu oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO₃ w C₂H₅OH). Powiększenie mikroskopowe ×400



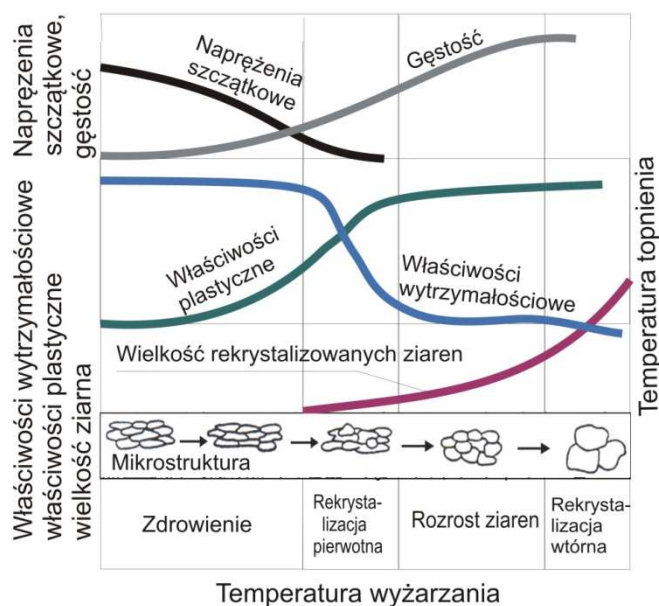
Rys. 4.7. Żelazo ARMCO po zgoicie. Struktura: ziarna ferrytu wydłużone (kształt wrzecionowaty) oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$

5. Rekrytalizacja metali

5.1. Wprowadzenie

5.1.1. Rekrytalizacja

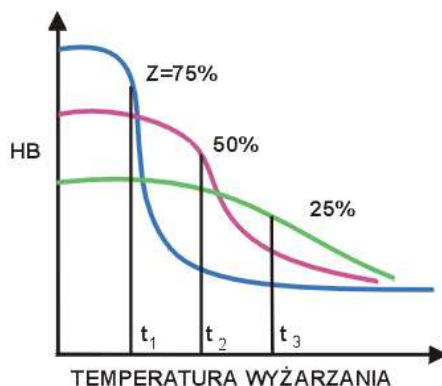
W wyniku odkształcenia plastycznego na zimno następuje zatrzymanie zmagazynowanej energii. Jest to stan metastabilny, dlatego podczas wygrzewania metalu energia ta wyzwala, co powoduje przejście metalu ze stanu metastabilnego w stan równowagi. Aby umożliwić coraz większe odkształcenie metalu musi on być poddany procesowi rekrytalizacji, czyli odtworzeniu wewnętrznej budowy krystalograficznej i przywracaniu mu w ten sposób właściwości plastycznych. Proces ten musi przebiegać w określonym czasie i powyżej określonej temperatury, zależnej od składu chemicznego oraz od wielkości wykonanego wcześniej odkształcenia metalu. Zmiany struktury i właściwości odkształconych metali wraz ze wzrostem temperatury wyżarzania przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Zmiany struktury i właściwości odkształconych metali wraz ze wzrostem temperatury wyżarzania [Rudn-98]

Zdrowienie metalu jest to proces cieplny, stosowany do usunięcia następstw obróbki plastycznej bez wytworzenia nowej struktury oraz bez przesunięć granic ziaren istniejącej struktury. Dostarczone w czasie zdrowienia ciepło zwiększa ruchliwość atomów i defektów sieci. Pozwala to na zbliżenie struktury do stanu równowagi i uwolnienie zmagazynowanej energii odkształcenia. Dochodzi do zaniku defektów punktowych oraz naprężeń, a w metalach z dużą energią błędów ułożenia dochodzi również do porządkowania dyslokacji, określane jako poligonizacja. Podczas zdrowienia nie zachodzą zmiany struktury dające się zauważyć za pomocą mikroskopu świetlnego. Zmieniają się właściwości fizyczne, które są zależą od występowania defektów punktowych, takich jak koercja i oporność elektryczna. W metalach niskostopowych zachodzi także zdrowienie granicy plastyczności – stopniowe obniżanie się granicy z czasem. W metalach z dużą energią błędów ułożenia, gdy zachodzi poligonizacja, dochodzi do nieznacznej zmiany właściwości mechanicznych: spadek wytrzymałości i wzrost plastyczności. Spadek właściwości wytrzymałościowych następuje także na skutek rozrostu podziaren.

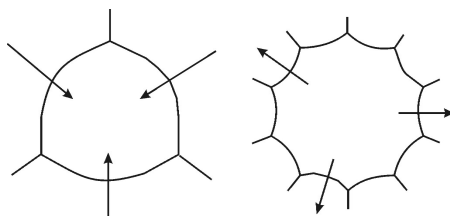
Pod pojęciem rekrytalizacji rozumie się powstawanie nowych, całkowicie odprężonych ziaren w strukturze. Rekrytalizacja jest procesem zasadniczo różnym od zdrowienia. Proces ten zachodzi w temperaturze wyższej niż zdrowienie, powyżej tzw. temperatury rekrytalizacji. Jest to temperatura oddzielająca zakres zdrowienia od zakresu rekrytalizacji. Do celów praktycznych stosuje się temperaturę progową rekrytalizacji T_r , która jest najniższą temperaturą procesu przy dużych odkształceniach i czasie wyżarzania 1-2 godziny. Temperatura rekrytalizacji T_r jest skorelowana z temperaturą topnienia ($T_{top.}$) i dla metali o czystości technicznej wynosi $(0,35 \div 0,59) \times T_{top.}$. Jest to pojęcie umowne, które nie opisuje właściwości fizycznej metali, zależy od wielu czynników, takich jak stopień zgniotu, sposób odkształcenia, szybkość i temperatura odkształcenia plastycznego, czas wyżarzania, wyjściowa wielkość ziarna metalu odkształcanego. Czynnikiem wpływającym na temperaturę początku rekrytalizacji jest stopień zgniotu. Im więcej energii odkształcenia jest zmagazynowane w materiale, tym niższa jest temperatura początku rekrytalizacji – rysunek 5.2. Istotnym czynnikiem jest także czas. Im dłuższy czas rekrytalizacji tym niższa temperatura i odwrotnie. Podczas rekrytalizacji następuje uwolnienie zmagazynowanej energii. Jest to spowodowane głównie zanikiem dyslokacji, których gęstość spada w tym okresie o kilka rzędów wielkości. Wpływa to na zmniejszenie umocnienia, a więc obniżeniu ulega twardość i wytrzymałość, a wzrastają właściwości plastyczne.



Rys. 5.2. Wpływ stopnia zgniotu na temperaturę rekrytalizacji [Wend-76]

Również obserwuje się istotne zmiany struktury polegające na zarodkowaniu i stopniowym rozroście nowych nieodkształconych ziaren wolnych od dyslokacji. Proces rekrytalizacji powoduje najczęściej utworzenie drobnoziarnistej struktury. Po zakończeniu rekrytalizacji pierwotnej materiał ma strukturę składającą się wyłącznie z nowych ziaren.

Rozrost ziaren zachodzi w uprzednio zrekrystalizowanym materiale, w którym utworzone w wyniku rekrytalizacji ziarna rozrastają się jedne kosztem drugich, dążąc do uzyskania kształtów zapewniających najmniejszą energię powierzchniową. Granice ziarna migrują w kierunku środka ich krzywizny, na skutek czego małe ziarna znikają, a duże rosną, co schematycznie przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Zależność kierunku migracji granic ziaren od charakteru ich wygięcia: wypukłych i wklęsłych [Skrz-19]

Do czynników hamujących migrację ziaren należą domieszki rozpuszczone w metalu i obecność obcych faz. Ważnym czynnikiem jest także obecność w materiale tekstury, ze względu na to, że migracja granic zachodzi z trudem, gdy różnica orientacji ziaren jest niewielka. Jeśli w strukturze są obecne bliź-

niaki, będą one także hamować rozrost ziaren, gdyż koherentne granice bliźniacze cechuje mała ruchliwość.

Rozrost ziarna jest zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ powoduje obniżenie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych w metalach i stopach. Wywołuje także wzrost przejściowej temperatury kruchości, co powoduje pękanie już przy niezbyt niskiej temperaturze.

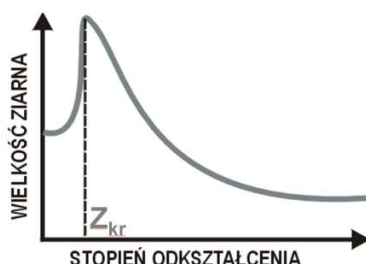
Przy dalszym wzroście temperatury wygrzewania rozrost ziaren jest stosunkowo niewielki. Dopiero od temperatury zwanej temperaturą rekrytalizacji wtórnej rozrost staje się gwałtowny. Polega na szybkim rozroście niektórych ziaren kosztem ziaren sąsiednich. Obejmuje on uprzywilejowane ziarna, których granice przemieszczają się w głąb sąsiednich ziaren. W początkowej fazie rekrytalizacji wtórnej występują znaczne różnice w wielkości poszczególnych ziaren, a po jej zakończeniu materiał ma gruboziarnistą strukturę. Wtórna rekrytalizacja, zwana jest także anormalnym lub przyspieszonym rozrostem ziaren.

Zasady rekrytalizacji, które sformułowali Burke i Turnbull [Weso-81]:

- W celu spowodowania rekrytalizacji niezbędne jest uprzednie odkształcenie materiału, większe od pewnej minimalnej wartości.
- Im mniejszy jest stopień odkształcenia, tym wyższa jest temperatura rekrytalizacji.
- Z wydłużeniem czasu wyżarzania obniża się temperatura rekrytalizacji.
- Końcowy wymiar ziaren zależy przede wszystkim od stopnia odkształcenia, a w mniejszym stopniu od temperatury rekrytalizacji. W celu uzyskania drobniejszego ziarna potrzebne jest większe odkształcenie i niższa temperatura wyżarzania.
- Im większe jest wyjściowe ziarno, tym dla zajścia rekrytalizacji w danej temperaturze i w danym czasie potrzebny jest większy stopień odkształcenia.
- W celu otrzymania jednakowego umocnienia przy wyższej temperaturze odkształcenia potrzebne jest większe odkształcenie.
- Długotrwałe wytrzymywanie w wysokiej temperaturze po zajściu całkowitej rekrytalizacji powoduje powiększenie rozmiarów ziaren (rozrost ziaren i rekrytalizacja wtórna).
- Materiał rekrytalizuje tym łatwiej, im zawiera mniej zanieczyszczeń. Zwiększenie czystości materiału powoduje obniżenie jego temperatury rekrytalizacji.

- Nowe ziarna nie rozrastają się kosztem ziaren osnowy o jednakowej lub bardzo zbliżonej orientacji.
- Przyłożenie zewnętrznych sił nie zwiększa szybkości rekrytalizacji; w przeciwieństwie do zdrowienia.

Zgniotem krytycznym nazywamy niewielki zgniot (zwykle w granicach 2 – 10 %), gdzie po rekrytalizacji uzyskuje się maksymalną wielkość ziarna – rysunek 5.4. Gruboziarnista struktura jest zwykle niepożądana, więc należy unikać niewielkich odkształceń, w zakresie zgniotu krytycznego przy obróbce plastycznej metali i stopów, które następnie poddawane są rekrytalizacji.



Rys. 5.4. Wpływ stopnia zgniotu na wielkość ziarna – zgniot krytyczny [Wend-76]

Zjawisko zgniotu krytycznego związane jest z faktem bardzo małych odkształceń w materiale, co z kolei związane jest z powstaniem zbyt małej, niewystarczającej ilości dyslokacji niezbędnych dla utworzenia budowy komórek dyslokacyjnych, z których w wyniku zdrowienia mogą powstać zarodki rekrytalizacji. Fakt ten jest przyczyną, że wydzielanie energii zgmagazynowanej po zajściu zdrowienia odbywa się jedynie poprzez ruch granic starych ziaren, które mogą osiągnąć przez to znaczne rozmiary, gdyż w takim przypadku ziarna bardziej odkształcone będą pochłaniane przez ziarna mniej odkształcone.

5.1.2. Obróbka plastyczna

W zależności od tego, jakie właściwości chcemy uzyskać, po obróbce plastycznej na zimno stosuje się odpowiednią obróbkę cieplną: wyżarzanie odprężające i wyżarzanie rekrytalizujące. W tabeli 5.1 przedstawiono temperatury odprężania, rekrytalizacji, rekrytalizowania i przeróbki plastycznej na gorąco kilku materiałów.

Wyżarzanie odprężające stopów żelaza jest procesem polegającym na nagrzewaniu do temperatury poniżej A_{C1} , zwykle niższej od 650°C , następnie wygrzewaniu w tej temperaturze i powolnym ostudzeniu. Wyżarzanie odprężające stosowane jest w celu usunięcia naprężeń własnych przy zachowaniu dobrych właściwości wytrzymałościowych metalu, jakie pozostają po obróbce

plastycznej na zimno. Przeprowadza się je w wąskim zakresie temperatur, w których następuje spadek naprężeń własnych, a nie ma znacznego spadku twardości.

Tabela 5.1. Temperatura odprężania, rekrytalizacji, rekrytalizowania i przeróbki plastycznej na gorąco kilku metali i stopów [Prow-00]

Materiał	Temperatura [°C]			
	Odpręża- nia	Rekrytali- zacji	Rekrytali- zowania	Przeróbki plastycznej
Al	120	150	370-400	350-450
Cu	150	180-230	400-500	800-1000
Ni	400	550-600	780-850	1100-1200
Sn	-	ok. 10	-	150-170
Pb	-	ok. 10	-	100-150
W	-	ok. 1100	1100-1300	1200-1800
Stal 0,1% C	400-450	450-550	600-700	850-1200
Mosiądz 10% Zn	280-350	335-370	650-700	900-950
Mosiądz 33% Zn	270-300	330-370	500-700	750-850
Brąz 7% Al	360-460	ok. 500	650-700	750-900

Wyżarzanie rekrytalizujące jest to proces polegający na nagrzewaniu stali uprzednio umocnionej przez zgniot do temperatury nieco powyżej temperatury początku rekrytalizacji, wygrzaniu w tej temperaturze i ochłodzeniu. Wyżarzanie rekrytalizujące ma na celu przywrócenie pierwotnych właściwości materiałowi odkształconemu. Przeprowadza się je zazwyczaj 50-250 °C powyżej temperatury rekrytalizacji. Ze względu na możliwość wystąpienia dużych różnic w wielkości ziarna nie należy wyżarzać w temperaturze zbliżonej do temperatury rekrytalizacji wtórnej. Wyżarzanie rekrytalizujące może być stosowane wielokrotnie, jako wyżarzanie międzyoperacyjne lub końcowe, ale nie po każdej operacji odkształcenia. Zależy to od umocnienia materiału, jakiemu uległ on w poszczególnych operacjach obróbki plastycznej na zimno. Wyżarza-

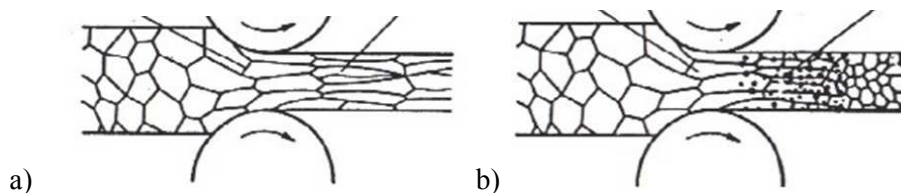
nie rekrytalizujące po zakończeniu procesu obróbki plastycznej na zimno stosowane jest tylko wówczas, gdy pożądane jest uniknięcie umocnienia.

Obróbka plastyczna na zimno jest stosunkowo prosta i bardzo wydajna. Jej szerokie stosowanie jest jednak ograniczone przez dwie przyczyny:

- odkształcenie nie może przekroczyć wartości granicznych, które mogą doprowadzić do pęknięcia materiału,
- silne umocnienie materiału odkształcanego zwiększa naciski jednostkowe na powierzchnie robocze narzędzi, co może spowodować ich pękanie.

Z tych powodów przyjęto, że twardość materiału obrabianego na zimno w stanie wyjściowym nie może być większa niż 130-140 HB. Gdy spełnienie tych warunków jest niemożliwe, konieczne jest stosowanie obróbki plastycznej na gorąco. Uzyskuje się wówczas zmniejszenie nacisków niezbędnych do kształtowania oraz zwiększenie dopuszczalnego odkształcenia.

Temperatura obróbki plastycznej na gorąco T mieści się w zakresie $0,6-0,9 \times T_{\text{top.}}$. Ograniczenie górnej temperatury wynika z takich przyczyn, jak silne utlenianie i tworzenie się struktury grubiarnistej. Dolną granicę ogranicza zarówno wzrost oporu plastycznego ponad dopuszczalny, jak i obniżenie plastyczności. Struktura części kształtowanych na gorąco zależy od takich czynników, jak temperatura i szybkość odkształcenia oraz prędkość chłodzenia po odkształceniu. Na rysunku 5.5 przedstawiono schemat tworzenia się struktury przy walcowaniu metalu na zimno (lub półgorąco) i na gorąco.



Rys. 5.5. Schemat tworzenia się struktury przy walcowaniu metalu: a) na zimno i półgorąco ($T < T_r$), b) na gorąco ($T > T_r$) [Przy-07]

Mimo takich zalet, jak wielokrotne obniżenie nacisków jednostkowych potrzebnych do kształtowania i wzrostu zdolności materiału do odkształceń plastycznych bez utraty spójności obróbka plastyczna na gorąco ma kilka wad, takich jak:

- utlenianie powierzchni półwyrobu,
- konieczność stosowania dużych nadadatków,
- znaczna energochłonność.

Obróbkę plastyczną na półgorąco, przeprowadza się w temperaturze podwyższonej, lecz w zasadzie poniżej temperatury rekrytalizacji. Eliminuje ona częściowo przedstawione powyżej wady, a zachowuje możliwie małe opory plastycznego kształtowania.

5.3. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zmianami właściwości mechanicznych i struktury zachodzącymi w metalach podczas wyżarzania rekrytalizującego.

5.3.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Rekrytalizacja (mechanizm rekrytalizacji, zmiana struktury, zmiana właściwości, wielkość ziarna po zgnioście i rekrytalizacji).
2. Wyżarzanie odprężające, wyżarzanie rekrytalizujące.
3. Pomiar twardości metodą Rockwella, Brinella i Vickersa.

5.3.2. Sprawozdanie powinno zawierać

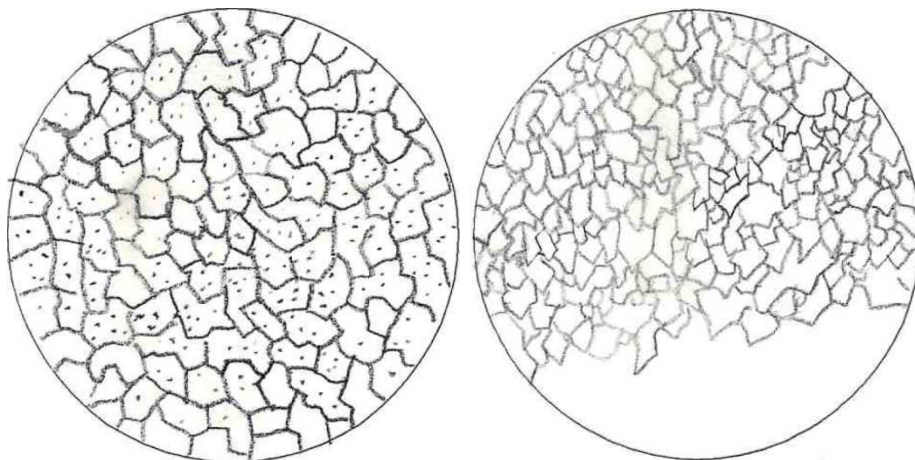
1. Warunki rekrytalizacji (temperatura i czas wyżarzania).
2. Wpływ rekrytalizacji na właściwości mechaniczne żelaza.
3. Tabela wyników pomiarów twardości próbek po wyżarzaniu rekrytalizującym (tabela 5.2).
4. Rysunki oraz opis struktury żelaza ARMCO po rekrytalizacji.
5. Analiza wyników i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

Tabela 5.2. Wyniki pomiarów

Stan materiału	Twardość wg metody Rockwella (skala HRB)					Stopień zgniotu Z [%]
	Nr pom.	1	2	3	średnia	
Po zgnioście						
Po rekrytalizacji						

4.2.3. Obrazy mikrostruktury

Na rysunku 5.6 przedstawiono przykładowe obraz mikrostruktury żelaza ARMCO po rekrytalizacji. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.



Rys. 5.6. Żelazo ARMCO – stan po rekrytalizacji. Struktura: ziarna ferrytu równoosiowe, wydzielienia cementytu trzeciorzędowego na granicach ziaren ferrytu oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$

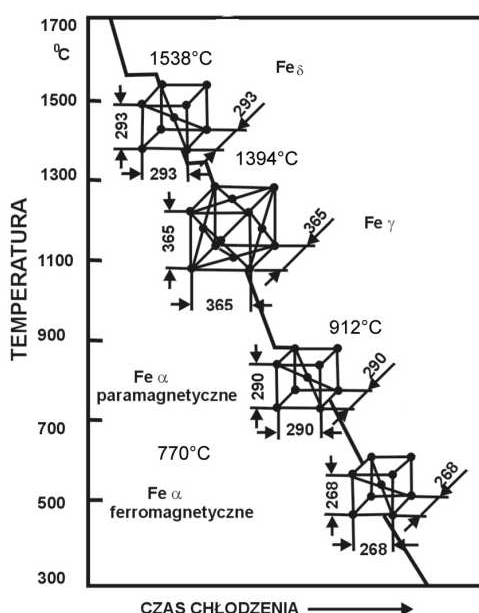
6. Analiza metalograficzna struktury faz i mieszanin występujących w układzie żelazo - węgiel

6.1. Wprowadzenie

Układ równowagi fazowej żelazo-węgiel ma istotne znaczenie, ponieważ teoria przemian w nim występujących stanowi podstawę licznych procesów technologicznych, którym poddawane są techniczne stopy żelaza, stanowiące jedne z najważniejszych materiałów konstrukcyjnych.

6.1.1. Właściwości żelaza i węgla

Żelazo jest pierwiastkiem metalicznym o masie atomowej 55,845. Jest najmniej szlachetnym pierwiastkiem grupy VIIIB układu okresowego. Pomimo dużego rozpowszechnienia w przyrodzie nie występuje w stanie rodzimym, wynika to z dużej podatności do tworzenia związków chemicznych, takich jak tlenki, wodorotlenki, siarczki, węglany lub krzemiany. Żelazo należy do pierwiastków polimorficznych, przemiany alotropowe zachodzące w żelazie podczas chłodzenia przedstawiono na rysunku 6.1.



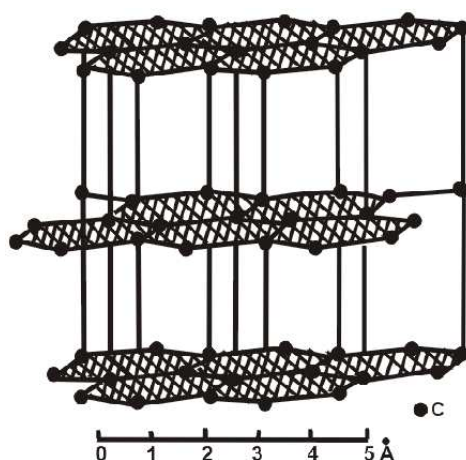
Rys. 6.1. Krzywa chłodzenia i przemiany zachodzące przy chłodzeniu czystego żelaza [Wend-76]

Właściwości mechaniczne czystego żelaza, w stanie wyżarzonym, zależą od stopnia jego czystości i wahają się w następujących granicach:

• gęstość [kg/m ³]	7,874×10 ³
• granica wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa]	180 ÷ 280
• granica plastyczności R_e [MPa]	90 ÷ 200
• wydłużenie A_{10} [%]	30 ÷ 50
• przewężenie Z [%]	70 ÷ 80
• udarność U [J/cm ²]	180 ÷ 280
• twardość HB	45 ÷ 80

Węgiel w stopach żelaza występuje w trzech postaciach: w stanie wolnym, jako grafit, w stanie związanym, jako węglik żelaza Fe_3C zwanym cemen-
tytem oraz w postaci roztworu stałego węgla w żelazie.

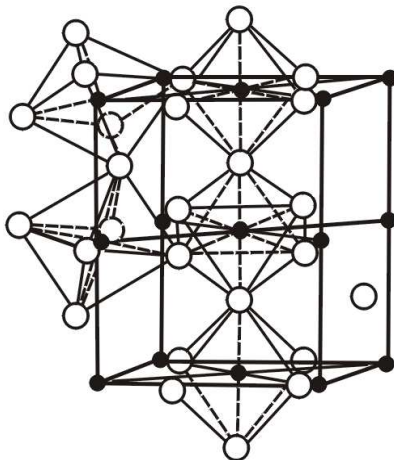
Grafit jest odmianą alotropową węgla, krystalizującą w układzie heksagonalnym (rys. 6.2). Jego ciężar właściwy wynosi 21,76 kN/m³, a gęstość $2,22 \times 10^3$ kg/m³. Właściwości mechaniczne grafitu są bardzo niskie, twardość wynosi zaledwie ~15HB, a granica wytrzymałości na rozciąganie R_m ok. 20 MPa.



Rys. 6.2. Struktura krystaliczna grafitu [Wend-76]

Cementyt jest fazą międzywęzłową o strukturze złożonej układu rombowego (rys. 6.3), zawierającą 6,67% wagowych węgla (25% at. C). W skład komórki elementarnej cementytu wchodzi 4 atomy węgla i 12 atomów żelaza. Cementyt odznacza się wysoką twardością (ok. 800 HB), dużą kruchością oraz dużą odpornością chemiczną. Jego ciężar właściwy wynosi 75,3 kN/m³, gęstość

$7,68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Do temperatury 230°C cementyt jest ferromagnetyczny, w wyższej temperaturze – paramagnetyczny. Za temperaturę topienia cementytu przyjmuje się 1227°C .



Rys. 6.3. Struktura krystaliczna cementytu [Gula-88]

6.1.2. Układ żelazo-węgiel

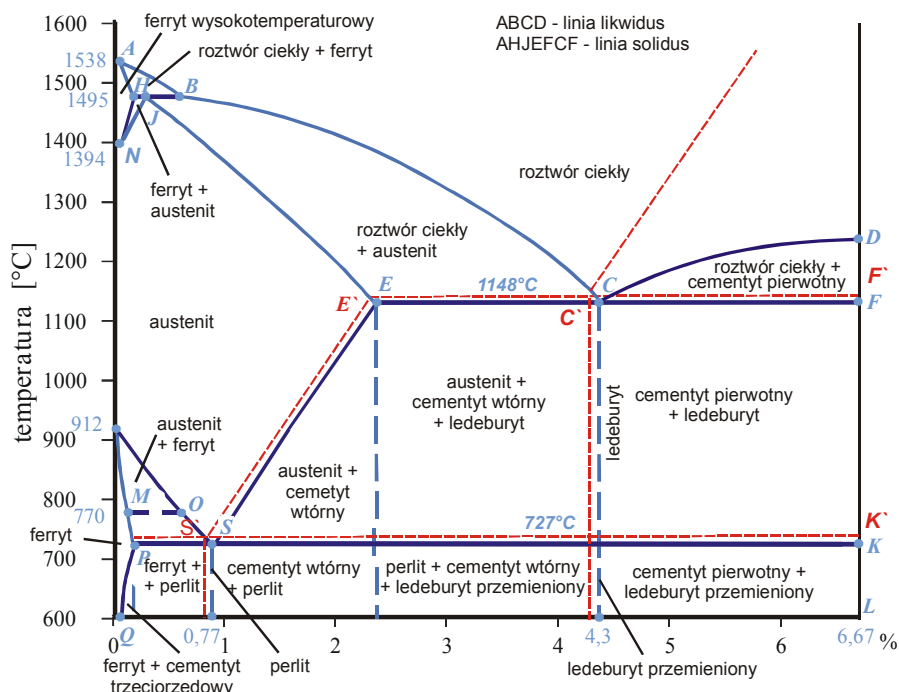
Cementyt jest fazą nietrwałą, w podwyższonej temperaturze ulega rozkładowi (grafityzacji) w myśl reakcji:



Z tego powodu rozróżnia się dwa wykresy równowagi fazowej układu żelazo-węgiel:

- układ stabilny żelazo-grafit,
- układ metastabilny żelazo-cementyt ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$).

Na rys. 6.4. przedstawiono układ żelazo-cementyt i żelazo-grafit. W tabeli 6.1. podano współrzędne (% C i temperatura) charakterystycznych punktów układów.



Rys. 6.4. Układ równowagi fazowej żelazo-cementyt (linia ciągła) i żelazo-grafit (czerwona linia przerywana) [PN-H-01200:1993]

Tabela 6.1. Współrzędne (% wag. C oraz temperatura w °C) charakterystycznych punktów w układzie żelazo-cementyt i żelazo-grafit (indeks `) [PN-H-01200:1993]

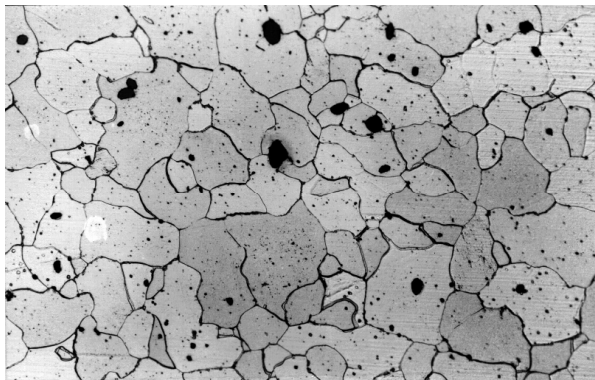
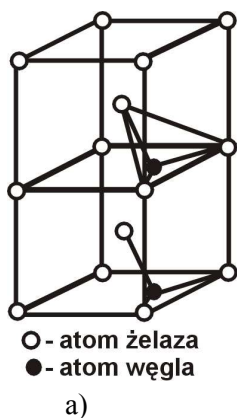
Ozn.	%C	Temp.	Ozn.	%C	Temp.	Ozn.	%C	Temp.
A	0	1538	E	2,11	1148	N	0	1394
B	0,53	1495	E`	2,08	1154	P	0,0218	727
C	4,30	1148	G	0	912	S	0,77	727
C`	4,26	1154	H	0,09	1495	S`	0,68	738
D	6,67	1227	J	0,17	1495	Q	0,008	20

6.1.3. Składniki fazowe i strukturalne układu żelazo-cementyt

W układzie żelazo-cementyt występują cztery składniki fazowe:

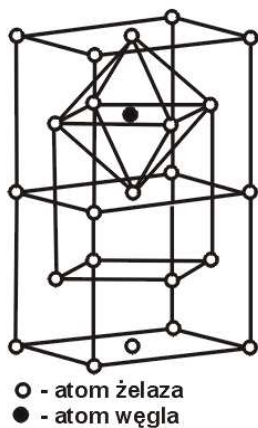
- Ciekły roztwór węgla i żelaza.
- Ferryt (α) – międzywęzłowy roztwór stały węgla w żelazie Fe_α o strukturze sieci A2 (rys. 6.5a). Maksymalna rozpuszczalność węgla wynosi 0,0218% w temp. 727 °C, a w temperaturze otoczenia - 0,008%. Do temperatury 770 °C ferryt jest ferromagnetyczny, powyżej – parama-

gnetyczny. W przedziale temperatury $1394 \div 1538$ °C istnieje tzw. ferryt wysokotemperaturowy.



Rys. 6.5. Sieć krystaliczna ferrytu (a) [Weso-81] oraz struktura ferrytu widoczna pod mikroskopem (trawiona NITAL 4%, pow. mikroskopowe $\times 400$) (b)

- Austenit (γ) – międzywęzłowy roztwór węgla w żelazie Fe_γ o strukturze A1 (rys. 6.6). Maksymalna rozpuszczalność węgla wynosi 2,11% w temp. 1148 °C, z obniżaniem temperatury rozpuszczalność maleje do 0,77% w 727°C.



Rys. 6.6. Sieć krystaliczna austenitu [Weso-81]

- Cementyt to węglik żelaza Fe_3C , złożona faza międzywęzłowa o budowie sieci rombowej (rys. 6.3). Rozróżnia się następujące rodzaje cementytu:
 - cementyt pierwotny (pierwszorzędowy) – wydzielony z fazy ciekłej podczas chłodzenia w wyniku malejącej rozpuszczalności węgla w cieczy – linia DC,
 - cementyt wtórny (drugorzędowy) – wydzielony z austenitu na skutek malejącej w nim rozpuszczalności podczas obniżania temperatury – linia ES,
 - cementyt trzeciorzędowy – wydzielony z ferrytu na skutek malejącej w nim rozpuszczalności podczas obniżania temperatury – linia PQ.

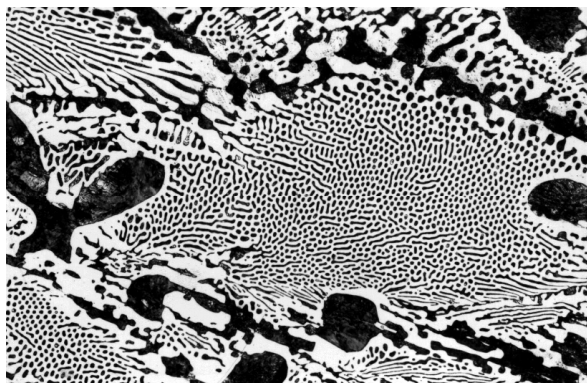
Składnikami strukturalnymi są następujące mieszaniny faz:

- Perlit – mieszanina eutektoidalna o zawartości węgla 0,77% , powstająca z rozpadu austenitu przy powolnym chłodzeniu poniżej temp 727°C (linia PSK), składająca się z naprzemianległych płytek ferrytu i cementytu (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Struktura perlitu (trawiona NITAL 4%, pow. mikroskopowe $\times 400$)

- Ledeburyt – mieszanina eutektyczna austenitu i cementytu o zawartości węgla 4,3%, powstająca przy powolnym chłodzeniu z rozpadu roztworu ciekłego poniżej temp 1148°C , (linia ECF). Poniżej temp. 727°C austenit zawarty w ledeburycie zamienia się w perlit, a ledeburyt zamienia się w ledeburyt przemieniony – mieszaninę perlitu z cementytem (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Struktura ledeburytu przemienionego (trawiona NITAL 4%, pow. mikroskopowe $\times 400$)

Właściwości składników fazowych i strukturalnych układu żelazo-cementyt przedstawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Właściwości składników fazowych i strukturalnych układu Fe-Fe₃C

Twardość HB	Granica wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie A [%]	Udarność KCU [J/cm ²]	Gęstość ρ [kg/m ³] $\times 10^3$	Granica plastyczności R_e [MPa]
feryt					
70-90	250-400	30-40	150-200	7,87-7,88	100-170
austenit					
200	700-800	40-60	200-300	8,0-8,1	250-260
cementyt					
600-840	30	0	-	7,68	-
perlit					
180-220	700-800	8	40	7,85	400
ledeburyt przemieniony					
450	30	0	-	7,77	-

6.1.4. Przemiany w układzie żelazo-cementyt

Przemianom w układzie Fe-Fe₃C przypisuje się oznaczenie literowe A (z francuskiego: arrêt – przystanek) i kolejny numer. Ponieważ większość tych przemian wykazuje dużą histerezę cieplną wprowadzono także indeksy: c – dla temperatury przy chłodzeniu (A_c) i r – dla temperatury przy nagrzewaniu (A_r). Jeżeli jest mowa o przemianie w stanie równowagi, to pisze się tylko symbol A [PN-H-01200:1993].

Wyróżnia się następujące przemiany:

- A_0 – przemiana magnetyczna cementytu, zachodząca w stałej temperaturze 230 °C,
- A_1 – przemiana eutektoidalna (perlityczna), zachodząca w stałej temperaturze 727 °C (wzdłuż linii PSK). Przy chłodzeniu powstaje z austenitu mieszanina eutektoidalna ferrytu i cementytu (perlit), przy nagrzewaniu z perlitu powstaje austenit,
- A_2 – przemiana magnetyczna ferrytu, zachodząca w stałej temperaturze 770 °C (linia M-O) dla stopów o zawartości węgla mniejszej od 0,6%; powyżej 0,6% węgla przemiana magnetyczna zachodzi równocześnie z przemianą alotropową,
- A_3 – przemiana alotropowa żelaza $\alpha \xleftrightarrow{\gamma}$, zachodząca w temperaturze 912 °C dla czystego żelaza i następnie obniżająca się wraz ze wzrostem zawartości węgla do 727 °C przy 0,77%C (linia GOS) i dalej w stałej temperaturze 727 °C (linia SK). W stopach przemiana A_3 oznacza koniec przemiany ferrytu w austenit przy nagrzewaniu lub początek wydzielania się ferrytu z austenitu przy chłodzeniu,
- A_4 – przemiana alotropowa żelaza $\gamma \xleftrightarrow{\alpha}$, zachodząca w stopach o zawartości węgla mniejszej od 0,17%. W czystym żelazie zachodzi w temperaturze 1394 °C, a następnie, wraz ze wzrostem zawartości węgla, temperatura przemiany wzrasta aż do 1495 °C i jest dalej stała dla stopów o zawartości 0,09÷0,17% C (linia NHI),
- A_{cm} – przemiana cementytowa, odpowiadająca granicznej rozpuszczalności węgla w żelazie γ . Przebiega od 727 °C przy 0,77%C do 1148 °C przy 2,11%C (linia ES). W stopach przemiana A_{cm} oznacza koniec rozpuszczania się cementytu wtórnego w austenicie (przy nagrzewaniu) lub początek wydzielania się cementytu wtórnego z austenitu przy chłodzeniu.

6.2. Część praktyczna

Ćwiczenie ma na celu utrwalenie umiejętności posługiwania się układem Fe-Fe₃C oraz zapoznanie się ze strukturą stopów Fe-C o różnej zawartości węgla.

6.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Umiejętność rysowania układu Fe-Fe₃C. Charakterystyczne punkty układu (oznaczenia literowe, zawartość węgla w % cięż., temperatury w °C).

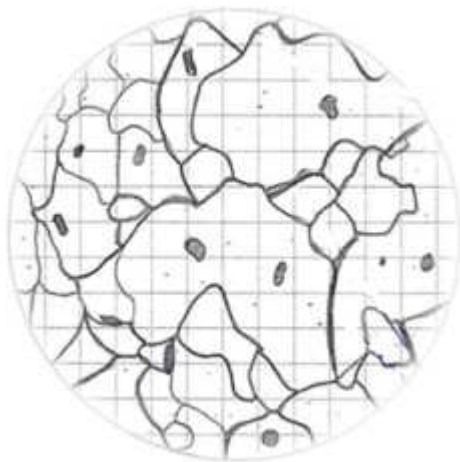
2. Znajomość faz i składników strukturalnych występujących w stopach Fe-C. Opis poszczególnych obszarów układu.
3. Znajomość przemian w układzie Fe-Fe₃C (eutektycznej, eutektoidalnej i perytektycznej).
4. Umiejętność rysowania krzywych chłodzenia oraz omawiania przemian zachodzących przy chłodzeniu stopów.
5. Umiejętność posługiwania się regułą faz Gibbsa oraz regułą dźwigni.

6.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

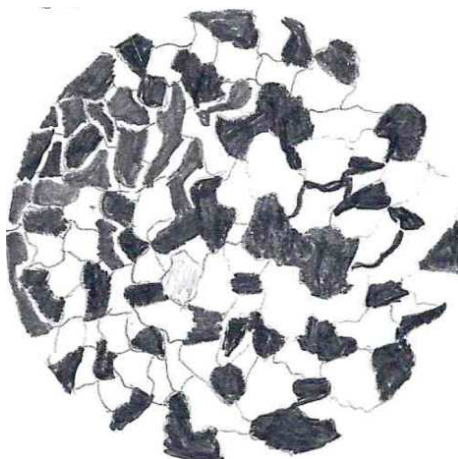
1. Cel ćwiczenia.
2. Wykonany samodzielnie rysunek układu Fe-Fe₃C z zaznaczeniem charakterystycznych punktów układu, opis wszystkich pól oraz definicje faz i mieszanin faz występujących w tym układzie.
3. Krzywe chłodzenia dla wybranych stopów.
4. Rysunki i opis struktury stopów obserwowanych na ćwiczeniu.
5. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6.2.3. Obrazy mikrostruktury

Na rysunkach 6.9-6.16 przedstawiono przykładowe obraz mikrostruktury stopów żelaza z węglem. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.



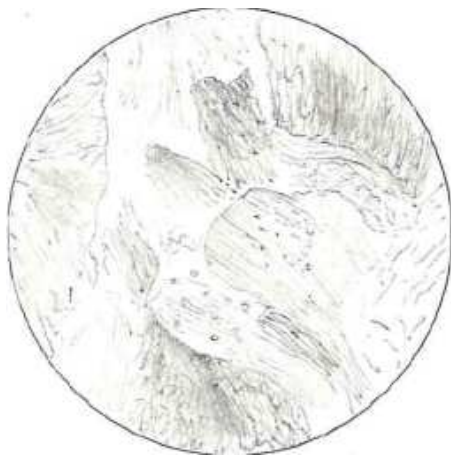
Rys. 6.9. Stop podeutektoidalny o zawartości węgla ok. 0,02%. Struktura: ziarna ferrytu równoosiowe, wydzielения cementytu trzeciorzędowego na granicach ziaren ferrytu oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO₃ w C₂H₅OH). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 6.10. Stop podutektoidalny o zawartości węgla ok. 0,4%. Struktura ferrytyczno-perlityczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



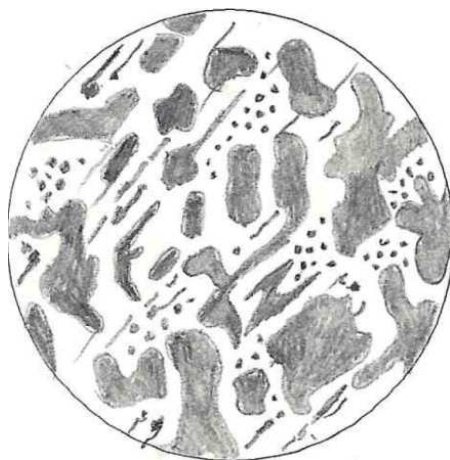
Rys. 6.11. Stop podutektoidalny o zawartości węgla ok. 0,7%. Struktura perlityczna na granicach ziaren siatka jasnego ferrytu oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



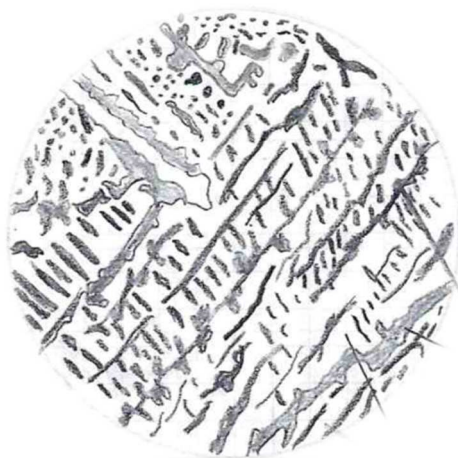
Rys. 6.12. Stop eutektoidalny o zawartości węgla ok. 0,8%. Struktura perlityczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 6.13. Stop nadeutektoidalny o zawartości węgla ok. 1,0%. Struktura perlityczna z wydzieleniami cementytu wtórnego na graniach ziaren oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 6.14. Stop podeutektyczny o zawartości węgla ok. 3%. Struktura: ziarna perlitu oraz drobnoziarnista mieszanina eutektyczna ledeburytu przemienionego. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 6.15. Stop eutektyczny o zawartości węgla ok. 4,3%. Struktura: drobnoziarnista mieszanina eutektyczna ledeburytu przemienionego. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 6.16. Stop nadeutektyczny o zawartości węgla ok. 5%. Struktura: drobnoziarnista mieszanina eutektyczna ledeburytu przemienionego oraz jasne podłużne wydzielenia cementytu pierwotnego. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 100$

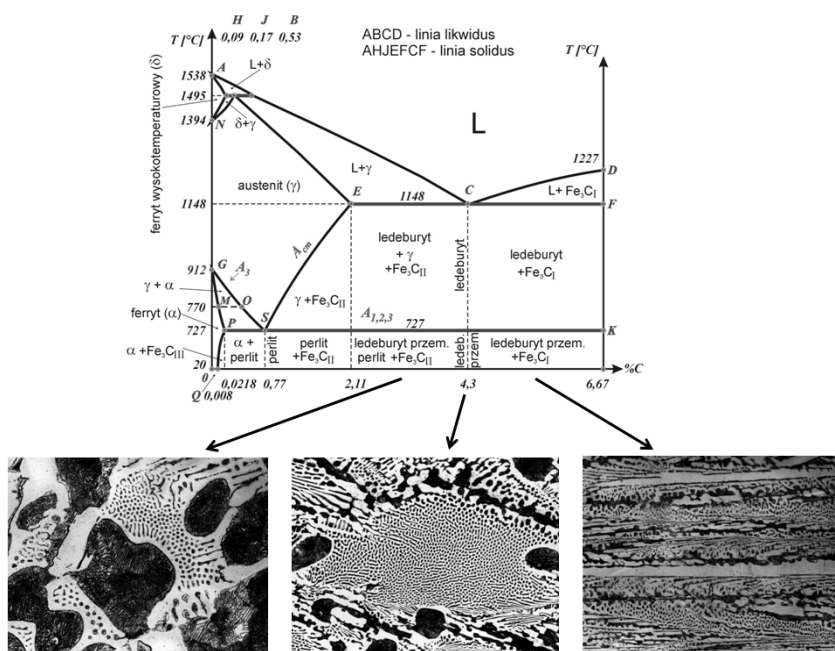
7. Analiza metalograficzna żeliw niestopowych

7.1. Wprowadzenie

7.1.1. Żeliwa niestopowe

Żeliwa niestopowe (nazywane wcześniej węglowymi) to odlewnicze stopy żelaza z węglem o teoretycznej zawartości $2,11 \div 6,67\% \text{C}$ (praktycznie do $4\% \text{C}$), zawierające jeszcze Si, Mn, P, S.

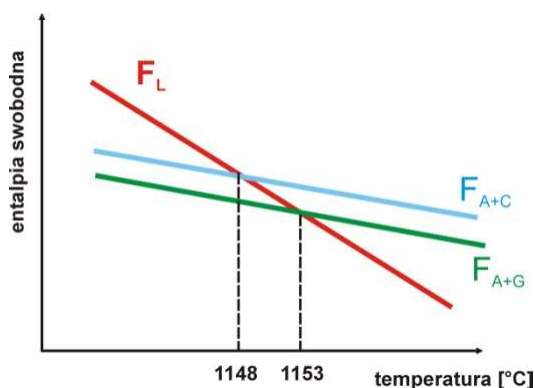
Jeżeli cały węgiel jest związany w postaci cementytu, żeliwa posiadają strukturę zgodną z metastabilnym układem żelazo-cementyt i określane są, jako żeliwa białe (surówki białe). W zależności od składu i struktury klasyfikuje się surówki: podeutektyczne (od $2,11$ do $4,3\% \text{C}$), eutektyczne ($4,3\% \text{C}$) nadeutektyczne (powyżej $4,3$ do $6,67\% \text{C}$) – rysunek 7.1. Strukturę żeliwa białego stanowi głównie ledeburyt przemieniony, perlit, cementyt i ewentualnie eutektyka fosforowa (steadyt). Z uwagi na dużą ilość cementytu surówki białe są bardzo twarde, kruche i trudno skrawalne. Nie stosuje się odlewów z żeliwa białego do wytwarzania części konstrukcyjnych.



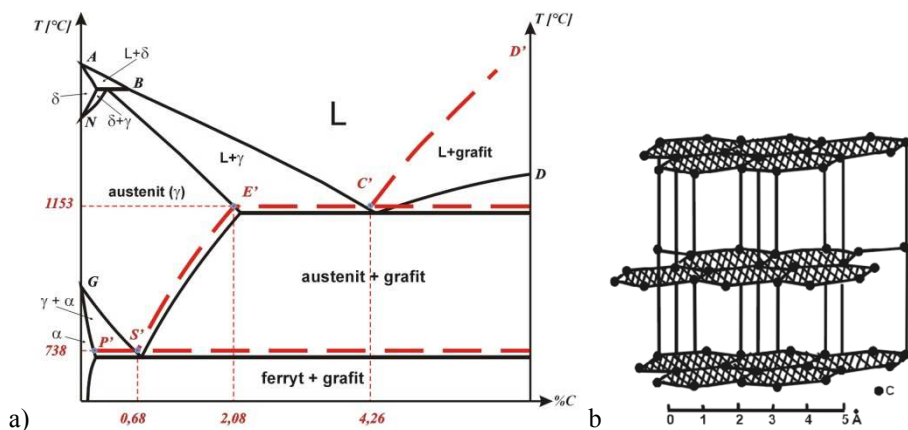
Rys. 7.1. Podział oraz struktura surówek białych (powiększenie mikroskopowe $\times 400$)

7.1.2. Proces grafityzacji

Wydzielanie się cementytu z austenitu lub cieczy przebiega łatwiej niż wydzielanie grafitu. Grafit (rys. 7.3b) jest fazą bardziej trwałą niż cementyt i mieszanina austenit-grafit ma mniejszą energię swobodną niż mieszanina austenit-cementyt – rysunek 7.2. W związku z powyższym punkty charakterystyczne stabilnego układu równowagi fazowej żelazo-grafit są nieznacznie przesunięte w kierunku wyższej temperatury i mniejszych zawartości węgla – czerwone przerywane linie na rysunku 7.3a.

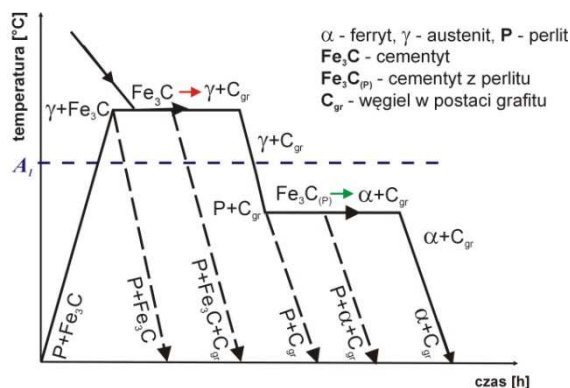


Rys. 7.2. Energia swobodna ciekłego stopu żelaza z węglem (F_L) i mieszaniny austenit - cementyt (F_{A+C}) oraz mieszaniny austenit - grafit (F_{A+G}) wraz ze zmianą temperatury [Gula-88]



Rys. 7.3. Układ równowagi fazowej żelazo-cementyt oraz żelazo-grafit (a); komórka sieciowa grafitu (b) [Wend-76]

Oprócz bezpośredniej krystalizacji grafitu z fazy ciekłej możliwy jest także sposób powstawania grafitu z rozkładu cementytu. Cementyt jest związkiem nietrwałym i w określonej temperaturze ulega rozkładowi, którego produktami są austenit i grafit lub ferryt i grafit – grafityzacja pośrednia $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{gr}$. Na schemacie (rysunek 7.4) przedstawiono proces grafityzacji - jako stan wyjściowy przyjęto strukturę żeliwa białego ($\text{P}+\text{Fe}_3\text{C}$) powstającą przy dostatecznie szybkim chłodzeniu.



Rys. 7.4. Zmiany struktury przy grafityzacji stopów żelaza [Gula-88]

Czynniki wpływające na grafityzację: termodynamiczny (zmiany energii swobodnej w układzie Fe- Fe_3C i Fe-grafit), położenie temperatur krzepnięcia w obu układach, przechłodzenie roztopionego żeliwa, przegrzanie roztopionego żeliwa, modyfikacja.

Grafit w żeliwach wpływa na polepszenie właściwości odlewniczych (zmniejszenie skurczu odlewniczego), polepszenie obrabialności, tłumienie drgań, zwiększenie właściwości ślizgowych, zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej (niewrażliwość na działanie karbu). Pogarsza też jakość żeliw ponieważ działa jak wewnętrzny karb, który powoduje nieciągłości w osnowie metalicznej, zmniejsza przez to wytrzymałość na rozciąganie, wpływa na zanik właściwości plastycznych żeliwa – wydłużenie mierzone w próbie rozciągania jest bliskie zeru.

7.1.3. Klasyfikacja żeliw niestopowych

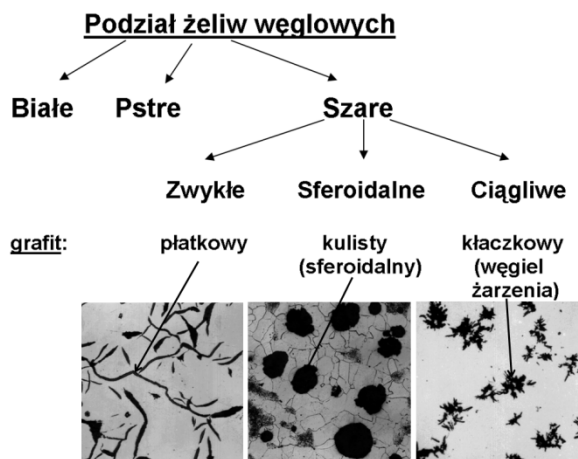
W zależności od postaci występowania węgla, żeliwa dzielimy na (rysunek 7.4):

- białe – węgiel jest w postaci związanej, w cementycie,

- połowiczne (pstre, zabilane) – węgiel występuje w cementycie i jako grafit,
- szare – węgiel występuje głównie w postaci wolnej jako grafit.

Żeliwa szare to takie, w których część węgla występuje w postaci wolnej (grafit), a węgiel związany w cementycie nie przekracza zawartości występującej w perlicie (0,77% C).

W żeliwach połowicznych występuje mieszana struktura, typowa dla żeliw białych jak i szarych. W ich strukturze występuje perlit, ledeburyt przemieniony, grafit, cementyt oraz steadyt (potrójna eutektyka fosforowa). Ze względu na znaczną kruchość i trudność obróbki żeliwa połowiczne, jak i żeliwa białe są rzadko stosowane (wyjątek stanowią tzw. odlewy zabilane).



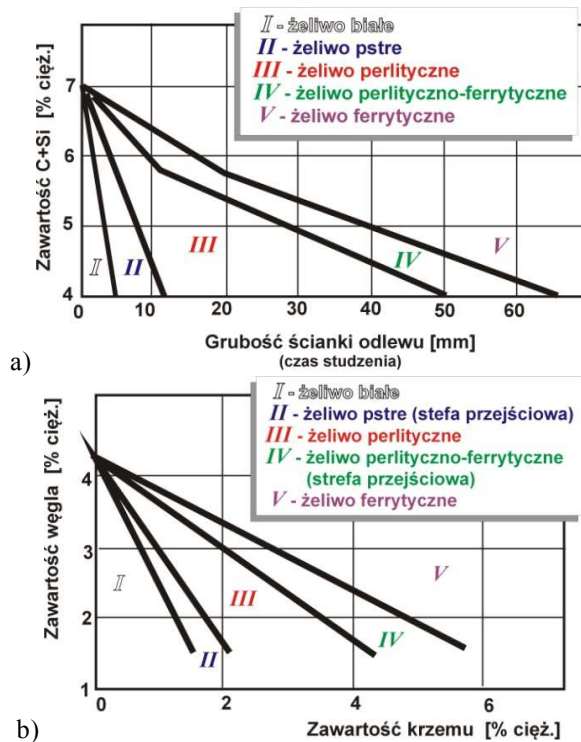
Rys. 7.4. Podział żeliw węglowych oraz postacie grafitu (powiększenie mikroskopowe $\times 400$)

W mikrostrukturze żeliw szarych można wyróżnić osnowy metaliczne: ferrytyczną, ferrytyczno-perlityczną, perlityczno-ferrytyczną lub perlityczną, co schematycznie przedstawiono na rysunku 7.5.

Aby orientacyjnie określić strukturę żeliwa w odlewie, znając jego skład chemiczny (zawartość węgla i krzemu) oraz prędkość chłodzenia, zależną od grubości ścianki odlewu, można posłużyć się diagramem strukturalnym – rysunek 7.6a. Domieszki występujące w żeliwach również w istotny sposób wpływają na warunki grafytyzacji a tym samym na strukturę oraz właściwości żeliw. Dla orientacyjnego określenia struktury żeliw w zależności od zawartości węgla i krzemu wykorzystuje się diagram przedstawiony na rysunku 7.6b.

OSNOWA METALICZNA	POSTAĆ CZĄSTEK GRAFITU		
	płatkowa	kłaczkowa (węgiel żarzenia)	sferoidalna
ferrytyczna			
ferrytyczno-perlityczna			
perlityczna			

Rys. 7.5. Klasyfikacja żeliw na podstawie struktury osnowy metalicznej i postaci wtrąceń grafitu [Gula-88]



Rys. 7.6. Diagramy strukturalne żeliw: a) wykres Greinera-Klingensteina [Wend-76], b) wykres Maurera (grubość ścianki odlewu 50 mm) [Gula-88]

Żeliwa szare zwykle wykazują niską wytrzymałość, niską odporność na zużycie ściernie oraz są dobrze skrawalne. Twardość i wytrzymałość żeliwa wzrasta wraz ze zwiększeniem udziału perlitu w osnowie metalicznej. Zgodnie z normą PN-EN 1561:2012, żeliwa szare klasyfikuje się według: wytrzymałości na rozciąganie i twardości (tabela 7.1).

Tabela 7.1. Klasyfikacja żeliw szarych zwykłych [PN-EN 1561:2012]

Według wytrzymałości na rozciąganie		Według twardości	
Gatunek żeliwa	$R_{m \text{ min.}}$ [MPa]	Gatunek żeliwa	HB
EN-GJL-100	100÷200	EN-GJL-HB-155	≤ 155
EN-GJL-150	150÷250	EN-GJL-HB-175	100÷175
EN-GJL-200	200÷300	EN-GJL-HB-195	120÷195
EN-GJL-250	250÷350	EN-GJL-HB-215	145÷215
EN-GJL-300	300÷350	EN-GJL-HB-235	165÷235
EN-GJL-350	350÷450	EN-GJL-HB-255	185÷255

Żeliwa szare zwykle wykazują dobrą obrabialność, leżność i skrawalność. Posiadają dużą zdolność tłumienia drgań, stałość wymiarów i bardzo dobre właściwości odlewnicze oraz niski koszt wytwarzania. Charakteryzują się stosunkowo niewielką: wytrzymałością, plastycznością, odpornością na ścieranie oraz małą odpornością na korozję w ośrodkach chemicznych. Z żeliw tych wytwarza się odlewy korpusów, rury, kształtki, pokrywy studzienek i włączów.

Przy wytwarzaniu wysokojakościowych żeliw szarych, jako podstawowy zabieg, stosowane jest modyfikowanie. Polega na wprowadzeniu tuż przed odlewaniem do ciekłego metalu niewielkich ilości modyfikatorów (np. żelazo-krzemu lub wapnio-krzemu) w ilości 0,1÷0,5%. Modyfikacja powoduje: rozdrobnienie struktury (zwłaszcza grafitu), otrzymanie jednorodnej struktury odlewu, wzrost wytrzymałości, zwiększenie zdolności tłumienia drgań. Modyfikacja najczęściej stosowana jest do produkcji żeliw szarych o podwyższonej wytrzymałości. Najkorzystniejsze właściwości wykazują żeliwa modyfikowane z osnową perlityczną. Wytrzymałość na rozciąganie R_m tych żeliw może być w zakresie 300-400 MPa. Żeliwa modyfikowane, podobnie jak żeliwa szare zwykłe, wykazują niskie właściwości plastyczne.

Sferoidyzacja polega na wprowadzeniu przed odlewaniem do ciekłego żeliwa stopów magnezu (z niklem lub z miedzią) lub ceru w celu uzyskania drobnoziarnistego grafitu kulistego na skutek zmian napięcia powierzchniowego zarodka grafitu. Żeliwa sferoidalne posiadają bardzo dobrą wytrzymałość i dobre właściwości plastyczne (tabela 7.2) oraz wykazują wyraźnie niższą skłonność do koncentracji naprężeń, dzięki grafitowi o kulistej postaci. Posiada-

ją lepszą leśność niż żeliwa szare, wysoką udarność, dość dużą wytrzymałość zmęczeniową, dobrą szczelność i są odporne na wysokie ciśnienia. Wykazują dużą skłonność do powstawania jam skurczowych i naprężeń własnych w odlewach, małą przewodność cieplną i wyższe są koszty produkcji. Stosowane są w silnikach samochodowych na cylindry, pierścienie tłokowe, wały korbowe i wały rozrządowe; w budowie obrabiarek na koła zębate, korpusy, wrzeciona; wykonuje się również walce, rury i części aparatury.

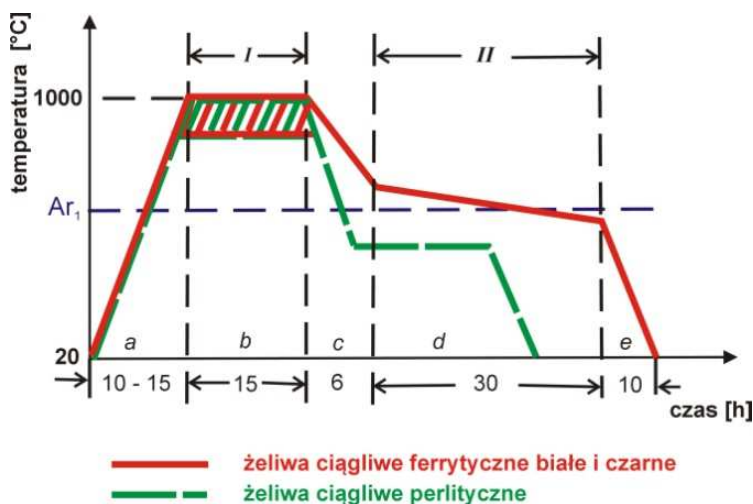
Tabela 7.2. Klasyfikacja żeliw sferoidalnych [PN-EN 1563:2012]

Znak żeliwa	Minimalne właściwości mechaniczne			Twardość HB
	R _m min. [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	
Sferoidalne				
EN-GJS-350-22	350	220	22	≤160
EN-GJS-400-18	400	250	18	130÷175
EN-GJS-400-15	400	250	15	135÷180
EN-GJS-450-10	450	310	10	160÷210
EN-GJS-500-7	500	320	7	170÷230
EN-GJS-550-3	550	360	3	190÷280
EN-GJS-600-3	600	370	3	190÷270
EN-GJS-700-2	700	420	2	225÷305
EN-GJS-800-2	800	480	2	245÷335
EN-GJS-900-2	900	600	2	280÷360
Sferoidalne – hartowane z przemianą izotermiczną				
EN-GJS-800-8	800	500	8	260÷320
EN-GJS-1000-5	1000	700	5	300÷360
EN-GJS-1200-2	1200	850	2	340÷440
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	380÷480

Żeliwo ciągliwe otrzymywane są z odlewów żeliwa białego po ich wyżarzaniu grafityzującym (rysunek 7.7). W zależności od zastosowanych parametrów technologicznych otrzymujemy żeliwo ciągliwe białe (odwęglone) i czarne (nieodwęglone) – tabela 7.3. Żeliwa ciągliwe wykazują dobre właściwości, zarówno wytrzymałościowe, jak i plastyczne – tabela 7.4. W grupie żeliw czarnych wg najnowszych klasyfikacji ujęte są również żeliwa perlityczne.

Podstawowe właściwości żeliw ciągliwych białych, to dobra szczelność i odporność na wysokie ciśnienie, bardzo dobra skrawalność, wysoka odporność na korozję, można je spawać. Posiadają relatywnie niskie właściwości mechaniczne i małą odporność na ścieranie. Ograniczeniem jest niemożliwość wykonywania odlewów o większej grubości ścianki z jednorodną strukturą.

Żeliwa ciągliwe czarne wykazują jednorodną strukturę w całym przekroju odlewu – przez to posiadają stałą twardość na całym przekroju, która nie zależy od grubości ścianek odlewu. Posiadają dobre właściwości wytrzymałościowe, wysokie właściwości plastyczne, dobrą udurowienie oraz są łatwo skrawalne. Są szczelne i odporne na wysokie ciśnienia, a także wykazują dobrą odporność korozyjną.



Rys. 7.7. Schemat przebiegu wyżarzania żeliwa białego w celu otrzymania żeliw ciągliwych [Wend-76]

Tabela 7.3. Główne parametry wyżarzania oraz otrzymywana struktura żeliw ciągliwych [Dobr-02]

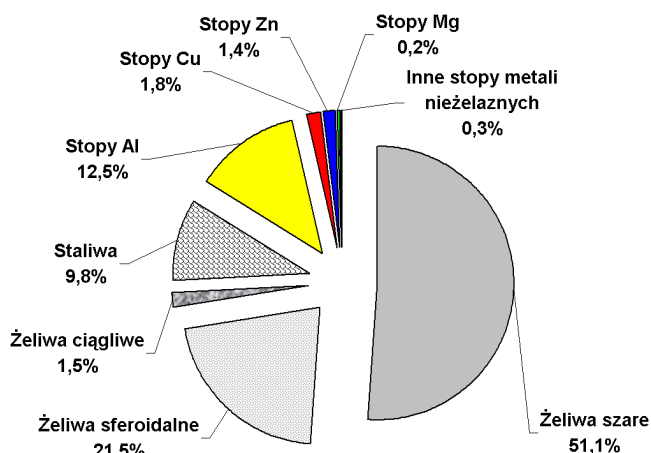
Rodzaj	Parametry wyżarzania				Struktura
	temperatura [°C]	atmosfera	czas [h]	sposób chłodzenia	
Żeliwo ciągliwe białe	950÷1000	utleniająca	60÷90	powietrze	Odwęglona ferrytyczna struktura warstwy zewnętrznej o grubości ok. 3÷5 mm
Żeliwo ciągliwe czarne	I 900÷1050 II 750	obojętna	15 40÷70	powietrze	ferryt ze zwartymi wydzieleniami węgla żarzenia
Żeliwo ciągliwe perlityczne	900÷1050		15		perlit z węglem żarzenia

Tabela 7.4. Klasyfikacja żeliw ciągliwych [PN-EN 1562:2019-04]

Gatunek żeliwa	Znak żeliwa	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A _{3,4} [%]	Twardość HB
		min. (na próbkach ø12mm)			
Ciągliwe białe	EN-GJMW-350-04	350	-	4	≤230
	EN-GJMW-360-12	360	190	12	≤200
	EN-GJMW-400-05	400	220	5	≤220
	EN-GJMW-450-07	450	260	7	≤220
Ciągliwe czarne	EN-GJMB-300-06	300	-	6	≤150
	EN-GJMB-350-10	350	200	10	≤150
	EN-GJMB-450-06	450	270	6	150÷200
	EN-GJMB-500-05	500	300	5	165÷215
	EN-GJMB-550-04	550	340	4	180÷230
	EN-GJMB-600-03	600	390	3	195÷245
	EN-GJMB-650-02	650	430	2	210÷260
	EN-GJMB-700-02	700	530	2	240÷290
	EN-GJMB-800-01	800	600	1	270÷320

Żeliwa ciągliwe stosowane są do wytwarzania na drobnych części maszyn rolniczych, włókienniczych, części samochodów, wagonów, traktorów i armatury.

Struktura żeliw determinuje ich właściwości – tabela 7.5. Otrzymana struktura jest wynikiem oddziaływania wielu czynników takich jak: parametry obróbki cieplnej, skład chemiczny, warunki podczas topienia, odlewania, krzepnięcia oraz w trakcie stygnięcia odlewów.



Rys. 7.8. Produkcja odlewów w podziale na tworzywa w świecie w 2000 r. [Tryb-02]

Tabela 7.5. Porównanie struktury i orientacyjnych właściwości różnych grup żeliw węglowych [Dobr-02]

Grupa żeliw		R_m [MPa]	$R_{0,1}$ [MPa]	A_5 [%]	HB	R_c [MPa]	R_g [MPa]
Żeliwo białe	nisko-węglowe	250÷300	-	0	450÷550	-	500 ÷ 700
	wysoko-węglowe	300÷450	-	0	450÷600	-	450 ÷ 500
Żeliwo szare zwykłe	ferrytyczne	125÷200	85÷ 140	0,5÷1,0	100÷150	600 ÷ 800	350 ÷ 450
	perlityczne	150÷250	100÷200	0,5	180÷240		
Żeliwo szare modyfikowane	perlityczne	300÷400	200÷275	0,5	210÷320	750 ÷ 1000	450 ÷ 650
Żeliwo sferoidalne	ferrytyczne	400÷450	200÷300	10÷25	130÷170	750 ÷ 900	900÷950
	perlityczne	600÷750	300÷400	3	240÷290	1000 ÷ 1250	900 ÷ 1000
Żeliwo ciągliwe	białe	400÷450	280÷320	5÷10	120÷220	-	-
	czarne	350÷400	260÷300	10÷20	110÷190	-	-

Pomimo wielu rodzajów istniejących na rynku materiałów konstrukcyjnych, żeliwo jest materiałem odlewniczym nadal często stosowanym w budowie maszyn i urządzeń – rysunek 7.8. Różnorodność zastosowań w przemyśle wynika przede wszystkim z dobrych właściwości wytrzymałościowych, jest materiałem dobrze skrawalnym, posiada stosunkowo niską temperaturę topnienia oraz względnie niskie koszty produkcji.

7.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze strukturą żeliw niestopowych białych i szarych w powiązaniu z ich właściwościami.

7.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Określenie żeliw niestopowych.

2. Wpływ składu chemicznego (zaw. % cięż. C, Si, Mn, P, S) i grubości ścianek odlewu na strukturę żeliw.
3. Struktura oraz właściwości żeliw białych i pstrych.
4. Wpływ osnowy metalicznej oraz postaci i rozmieszczenia grafitu na właściwości żeliw szarych.
5. Otrzymywanie, właściwości oraz zastosowanie żeliw szarych zwykłych. Modyfikowanie żeliw.
6. Otrzymywanie, właściwości oraz zastosowanie żeliw sferoidalnych.
7. Otrzymywanie, właściwości oraz zastosowanie żeliw ciągliwych.
8. Podział oraz znakowanie żeliw szarych wg PN-EN.

7.2.2 Sprawozdanie powinno zawierać

1. Cel ćwiczenia.
2. Wykres zależności struktury żeliw w zależności od łącznej zawartości węgla i krzemu oraz grubości ścianek odlewu (wg F. Greinera i T. Klingensteina).
3. Wykres zależności struktury żeliw od zawartości węgla i krzemu (wg E. Maurera).
4. Podział oraz znakowanie żeliw szarych wg PN-EN.
5. Rysunki oraz opis struktury żeliw obserwowanych na ćwiczeniu.
6. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

7.2.3. Obrazy mikrostruktury

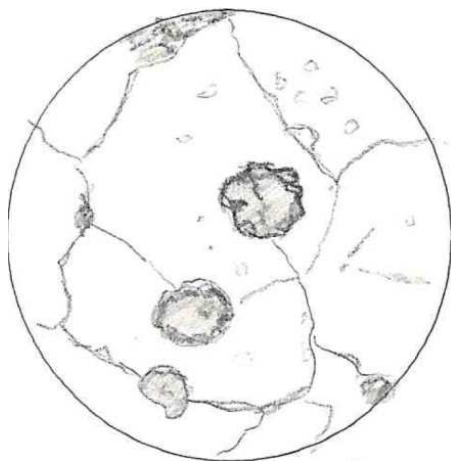
Na rysunkach 7.9-7.12 przedstawiono przykładowe obraz mikrostruktury żeliw niestopowych. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studentów.



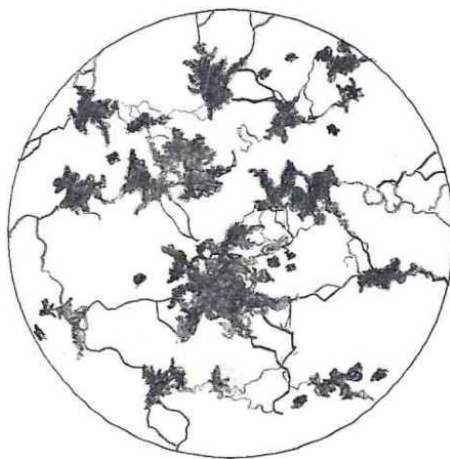
Rys. 7.9. Żeliwo pstre. Struktura: osnowa metaliczna perlitu z jasnymi obszarami ledeburytu przemienionego, ciemne wydzielenia grafitu płatkowego. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 7.10. Szare zwykłe EN-GJL-250. Struktura z osnową metaliczną perlityczną z jasnymi obszarami eutektyki fosforowej (steadyt), wydzielienia grafitu płatkowego. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 7.11. Żeliwo sferoidalne EN-GJS-350-22. Struktura z osnową metaliczną ferrytyczną, wydzielienia grafitu sferycznego oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 7.12. Żeliwo ciągliwe ferrytyczne czarne EN-GJMB-300-06. Struktura z osnową metaliczną ferrytyczną, wydzielienia węgla żarzenia oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$

8. Struktura i właściwości stali niestopowych

8.1. Wprowadzenie

8.1.1. Struktura i właściwości stali niestopowych

Stal jest to obrobiony plastycznie i cieplnie obrabialny techniczny stop żelaza z węglem zawierający poniżej 2,11 %C otrzymywany w procesach stalowniczych ze stanu ciekłego (rysunek 8.1). Stale zawierają również, w ograniczonej ilości, inne pierwiastki (domieszki i zanieczyszczenia), jako pozostałości z procesu metalurgicznego wytapiania stali.



Rys. 8.1. Wytwarzanie stali i innych stopów żelaza z węglem [Blic-17-1]

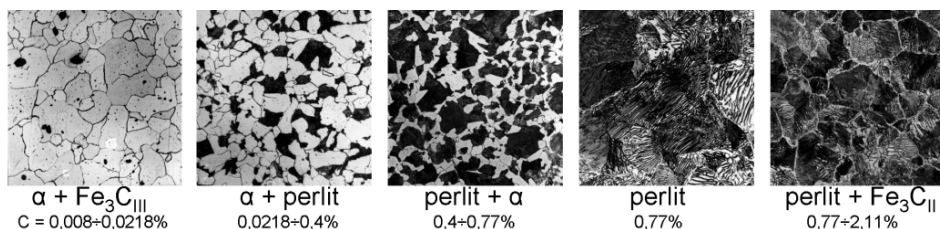
Graniczne wartości zawartości pierwiastków dla określenia granicy między stalami stopowymi i niestopowymi według analizy wytopowej zamieszczono w tabeli 8.1 (wartości w % określają udział masowy pierwiastków).

Najistotniejszy wpływ na zmiany struktury i właściwości mechanicznych stali wywiera węgiel (rysunek 8.2 i 8.3). W miarę podwyższania stężenia węgla w strukturze stali zmniejsza się udział plastycznego, miękkiego ferrytu, a zwiększa zawartość kruchego i twardego cementytu. Stale o większej zawartości węgla charakteryzują się wyższą twardością HB, wytrzymałością na roz-

ciąganie R_m i posiadają wyższą granicę plastyczności R_e . W stalach zawierających powyżej 0,9 %C wydzielenia kruchego cementytu na granicach ziaren perlitu powodują spadek R_m i R_e . Wzrost stężenia węgla wpływa również na obniżenie właściwości plastycznych, pogarsza się ciągliwość stali, a szczególnie wydłużenie A i przewężenie Z oraz udurowienie KU .

Tabela 8.1. Stężenie graniczne pierwiastków stopowych w stalach [PN-EN 10020:2003]

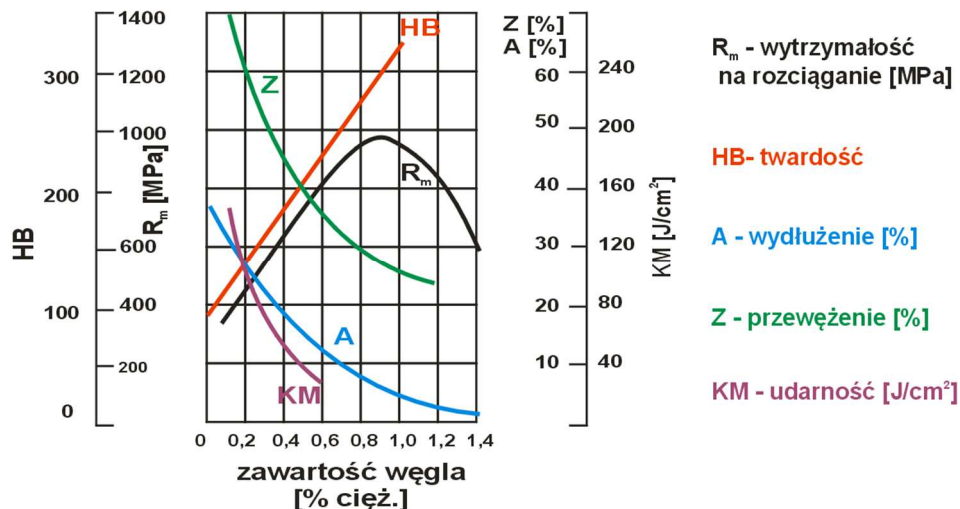
Pierwiastek	Udział [%]	Pierwiastek	Udział [%]
Al	0,30	Ni	0,30
B	0,0008	Pb	0,40
Bi	0,10	Se	0,10
Co	0,30	Si	0,60
Cr	0,3	Te	0,10
Cu	0,4	Ti	0,05
Lantanowce (każdy)	0,1	V	0,10
Mn	1,65*	W	0,30
Mo	0,08	Zr	0,05
Nb	0,06	Inne (poza C, P, S i N) -każdy	0,10
* - maksymalnie 1,8%			



Rys. 8.2. Wpływ zawartości węgla na strukturę stali niestopowych (powiększenie mikroskopowe struktur $\times 400$)

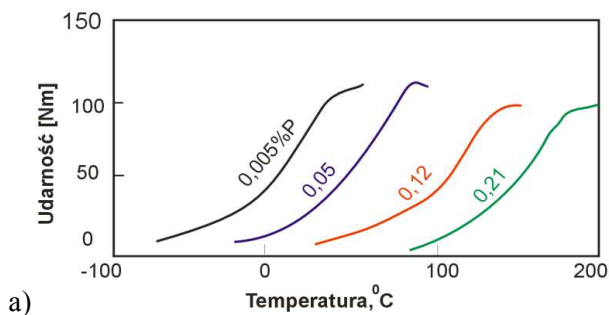
Domieszki (Al, Si, Mn) znajdujące się w stalach, to pozostałość z procesu metalurgicznego wytopu stali, a także z przetopu stalowego złomu. Aluminium jest najsilniejszym odtleniaczem stali, ma również duże powinowactwo do azotu, powoduje rozdrobnienie ziarna stali. Krzem wpływa korzystnie na obniżenie stężenia gazów w lanej stali, a także chroni przed segregacją siarki i fosforu. Mangan ma korzystne oddziaływanie, tworząc siarczki MnS o wysokiej temperaturze topnienia ($1620^\circ C$). Przy niedoborze manganu tworzą się siarczki żelaza (FeS), które wchodzą do łatwo topliwej eutektyki (ok. $1000^\circ C$), powodu-

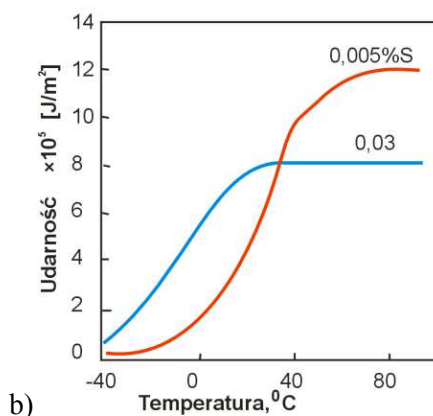
jąc kruchość stali na gorąco podczas ich przeróbki plastycznej. Mn wpływa jednak niekorzystnie rozrost ziaren podczas obróbki cieplnej i plastycznej na gorąco.



Rys. 8.3. Wpływ zawartości węgla na właściwości stali niestopowych w stanie wyżarzonym [Rudn-98]

Zanieczyszczenia, z pierwiastkami P, S, O, H, N, Sn, Sb, As, wpływają zwykle niekorzystnie na właściwości stali. Fosfor, który rozpuszcza się w ferrycie, podwyższa temperaturę przejścia ich w stan kruchy (niskotemperaturowa kruchość – rysunek 8.4), powoduje również gruboziarnistość i segregację. Siarka wykazuje dużą skłonność do segregacji, pogarsza też spawalność, wytrzymałość zmęczeniową, wpływa na obniżenie temperatury przejścia stali w stan kruchy ale zmniejsza ich udarność w stanie ciągliwym.





Rys. 8.4. Wpływ zawartości zanieczyszczeń: a) fosforu, b) siarki – na udarność stali [Gula-88]

8.1.2. Klasyfikacja stali niestopowych

Klasyfikacji stali można dokonać pod względem różnych kryteriów – tabela 8.2. Najczęściej ze względów praktycznych stosuje się klasyfikację opierającą się na składzie chemicznym lub zastosowaniu.

Tabela 8.2. Wybrane kryteria klasyfikacji stali [Dobr-02]

Kryterium podziału	Przykładowe rodzaje oraz grupy stali
Skład chemiczny	Węglowe (niestopowe), stopowe
Podstawowe zastosowanie	Konstrukcyjne, maszynowe, narzędziowe, o szczególnych właściwościach
Jakość (m.in. stężenie S i P)	Jakościowe, specjalne
Metody wytopu	Martenowska, elektryczna, konwertorowa itp.
Stopień odtleniania	Nieuspokojone, półuspokojone, uspokojone
Rodzaj wyrobów	Odkuwki, blachy, pręty, druty, itp.
Metoda wytwarzania	Lane, kute, walcowane na gorąco, walcowane na zimno, ciągnione
Stan kwalifikacyjny	Surowe, wyżarzone zmiękczająco lub normalizująco, ulepszone cieplnie i inne

Zawartość zanieczyszczeń gazowych w stalach w zależności od stosowanego procesu wytapiania (rys. 8.1) zamieszczono w tabeli 8.3. Wodór powoduje powstawanie naderwań (tzw. płatków), odwęgleń, pęcherzy gazowych oraz segregację fosforu. Azot obniża plastyczność i powoduje kruchość na niebiesko oraz skłonność do starzenia, szczególnie po zgnioście. Tlen wpływa na obniżenie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych stali oraz zmniejsza uduchność silnie podwyższając próg kruchości na zimno.

Tabela 8.3. Zawartość gazów w stali w zależności od sposobu produkcji [Gula-88]

Gaz	Zawartość gazów [%]			
	Proces elektryczny	Proces martenowski zasadowy	Proces konwertorowo-tlenowy	Proces besemermowski
Wodór	0,0004-0,0006	0,0003-0,0007	0,0001-0,0003	0,0004-0,0007
Azot	0,007-0,010	0,004-0,006	0,002-0,005	0,010-0,15
Tlen	0,002-0,004	0,005-0,008	0,005-0,008	0,01-0,03

Ze względu na stopień odtlenienia wyróżnia się 3 rodzaje stali (tabela 8.4). Stal nieuspokojona – podczas krzepnięcia we wlewnicy zachodzi reakcja węgla z tlenem rozpuszczonym, powstający w wyniku tego tlenek węgla burzliwie ulatnia się z ciekłej stali. W stali półuspokojonej stężenie rozpuszczonego tlenu obniżono do takiego stopnia, by przy krzepnięciu we wlewnicy zachodziły jedynie reakcje węgla z tlenem w ograniczonej ilości. W stalach uspokojonych nie zachodzą reakcje tlenu z węglem przed odlaniem do wlewnicy – stale wlane do wlewnicy zachowują się spokojnie. Odmianą takiej stali jest stal uspokojona niestarczająca się, którą odtleniano aluminium.

Tabela 8.4. Porównanie stali odtlenionych różnymi sposobami [Wend-76]

Stal	Odtlenianie	Uzysk [%]	Zawartość Si [%]	Kolejność pod względem *)	
				jakości	kosztów
Uspokojona	Mn+Si+Al	85-90	0,14-0,30	1	3
Półuspokojona (Y)	Mn+Al	90-95	0,05-0,010	2	2
Nieuspokojona (X)	Mn	95-100	0,05	3	1
*) Najwyższą jakość oznaczono przez 1, najwyższy koszt przez 3					

Stężenie zanieczyszczeń (siarki i fosforu) jest kryterium podziału stali ze względu na jakość (tabela 8.5). Wtrącenia niemetaliczne tlenków i siarczaków, w procesie odkształcenia plastycznego układają się w osnowie metalicznej w postaci poprzerywanych pasemek (tlenki), albo jako wydłużone soczewki,

zorientowane wzdłuż kierunku walcowania. Są ośrodkami krystalizacji ferrytu, w wyniku czego powstaje w stalach pasmowa struktura ferrytyczno-perlityczna, co powoduje silną anizotropię właściwości.

Tabela 8.5. Podział stali ze względu na jakość [Rudn-98]

Jakość stali	Maksymalna zawartość w [%]	
	P	S
Zwykła	0,050	0,050
Wyższa	0,040	0,040
Najwyższa	0,030	0,030

8.1.3. Podział stali niestopowych – przeznaczenie oraz zasady znakowania

W normach [PN-EN 10020:2003 oraz PN-EN 10025-1:2007 i PN-EN 10027-1:2016-12] zawarto klasyfikację i zasady znakowania stali. Na podstawie normy [PN-EN 10020:2003] stale niestopowe dzieli się na klasy jakości:

- stale jakościowe,
- stale specjalne.

We wcześniejszych normach klasyfikowana była grupa stali niestopowych podstawowych. Obecnie włączona jest do grupy stali niestopowych jakościowych. Normy [PN-EN 10027-1:2016-12 i PN-EN 10027-2:2015-07] nie unieważniają norm krajowych (PN), a ponadto dopuszczają tworzenie znaków dowolnych stali, nieujętych w normach, na zasadach w nich przyjętych.

W normach europejskich [PN-EN 10027-1:2016-12] używa się dwóch systemów oznaczania stali:

- Znakowy – znak stali zawiera symbole literowe i cyfry:
 - znaki zawierające informacje o zastosowaniu i właściwościach stali (tabela 8.6),
 - znaki informujące o składzie chemicznym stali (dzieli się jeszcze na 4 podgrupy; po znakach głównych mogą być stosowane symbole uzupełniające).
- Cyfrowy – znak stali stanowią tylko z cyfry.

Dla każdego gatunku stali nadany jest znak i numer, który jednoznacznie identyfikuje tylko jeden materiał. W przypadku staliw i stali na początku znaku są odpowiednie litery (G, S, P, L, E) a następnie liczba informująca o właściwościach (R_e) oraz dodatkowe symbole – zgodnie z tabelami 8.6 i 8.7.

Tabela 8.6. Ważniejsze znaki stali informujące o zastosowaniu oraz właściwościach mechanicznych [PN-EN 10027-1:2016-12]

Oznaczenie literowe stali	Oznaczenie cyfrowe
S – konstrukcyjne P – pracujące pod ciśnieniem L – na rury przewodowe E – maszynowe	Liczba równa $R_{e\ min}$ [N/mm ²] dla najmniejszej grubości wyrobu
B – do zbrojenia betonu	Charakterystyczna R_e [N/mm ²]
Y – do betonu sprężonego	Minimalna $R_{m\ min}$ [N/mm ²]
R – na szyny lub w postaci szyn	Minimalna $R_{m\ min}$ [N/mm ²]
H – wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali o podwyższonej wytrzymałości do kształtowania na zimno	Minimalna $R_{e\ min}$ [N/mm ²]
T – na blachy ocynkowane	Minimalna $R_{m\ min}$ [N/mm ²]
D – wyroby ze stali miękkich do kształtowania na zimno (poza tymi ze znakiem H)	
M – elektrotechniczne	

Tabela 8.7. Stale konstrukcyjne – oznaczenia [PN-EN 10027-1:2016-12]

Główne symbole		Dodatkowe symbole					
Litery	Wł. mechaniczne	Grupa 1				Grupa 2	Dla wyrobów
S – stal G – staliwo	Minimalna granica Re [MPa] dla najmniejszego zakresu wymiarów produkowanych elementów	Udarność [J]			Temp. próby [°C]	C – do formowania na zimno, D – do walcowania na gorąco, E – do emaliowania, F – do kucia, L – do stosowania w niskich temperaturze, T – na rury, W – odpornych na korozję atmosferyczną	Według załączników do normy
		27[J]	40 [J]	60 [J]			
		JR	KR	LR	20		
		J0	K0	L0	0		
		J2	K2	L2	-20		
		J3	K3	L3	-30		
		J4	K4	L4	-40		
		J5	K5	L5	-50		
		J6	K6	L6	-60		
		M – walcowanych termomechanicznie, N – normalizowanych lub walcowanych normalizująco, Q – ulepszanych cieplnie, G – inne cechy					

Stale z grupy niestopowych konstrukcyjnych stosuje się zwykle na mało odpowiedzialne konstrukcje przeznaczone dla budownictwa przemysłowego i ogólnego, które stosowane są do połączeń spawanych, nitowanych lub śrubo-

wych. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne wybranych stali niestopowych konstrukcyjnych walcowanych na gorąco przedstawiono w tabeli 8.8.

Tabela 8.8. Stale konstrukcyjne niestopowe walcowane na gorąco [PN-EN 10025-1:2007]

Znak stali wg PN-EN (PN)	Maksymalna zawartość pierwiastków				Minimalne właściwości mechaniczne		
	C	Mn	Si	N	R _{eH} ^{a)} MPa	R _m ^{b)} MPa	A ^{c)} %
S185 (St0)	-	-	-	-	185	290	18
S 235JR (St3S)	0,20	1,4		0,009	235	340	26
S235J2G4	0,17						
S275JR (St4)	0,21	1,5			275	410	22
S355JR (St7)	0,24	1,6	0,55		355	490	
S355K2G4	0,20		-				
E295 (St5)	-	-	-	0,009	295	470	20
E335 (St6)					335	570	16
E360 (St7)					360	670	11
Próbki wzdłużne z wyrobów o grubości równej: a) 16 mm, b) 3÷100 mm, c) 3÷40 mm. Zawartości S, P ≤ 0,045%. Znaki w nawiasach to odpowiedniki wg PN							

Stale niestopowe do utwardzania powierzchniowego i ulepszenia cieplnego oznaczane są literą C, a po niej liczbą określającą zawartość węgla w setnych częściach % (0,22÷0,60). Litera E na końcu znaku oznacza wymaganą maksymalną zawartość S, natomiast litera R określa zakres zawartości S. Właściwości oraz skład wybranych z tej grupy stali zamieszczono w tabeli 8.9. Po znakach głównych mogą występować litery (np. C – przeznaczone do formowania na zimno, D – do ciągnięcia drutu, U – narzędziowe, W – na walcówkę). W ten sam sposób oznaczane są stale niestopowe do nawęglania: C10E(R), C15E(R), C16E(R), według [PN-EN 10084:2008].

Tabela 8.9. Stale niestopowe do ulepszania cieplnego [PN-EN ISO 683-2:2018-08]

Znak stali	Zawartość pierwiastków			Temperatura, °C		Minimalne właściwości mechaniczne ^{b)}				
	PN-EN (PN)	C	Mn	inne ^{a)}	austeni- tyzowa- nia	odpusz- czania	R _e MPa	R _m MPa	A %	KV J
C22E (20) C22R (20)	0,21	0,55	Cr ≤ 0,40	860÷900	550÷ 660	340	600	20	50	
C40E (40) C40R (40)	0,40	0,65	Mo ≤ 0,10 Ni ≤ 0,40	830÷870		460	650	16	30	
C60E (60) C60R (60)	0,60	0,75	Cr+ Mo+ Ni ≤ 0,6 3	800÷840		580	850	11	-	
a) Zawartość: Si ≤ 0,40 %, P ≤ 0,035 %; symbol R w znaku - S = 0,020÷0,040, sym- bol E w znaku S ≤ 0,035%. b) Wartości dotyczą wyrobów o średnicy ≤ 16mm lub grubości ≤ 8mm. Znaki w nawiasach to odpowiedniki wg PN										

Do stali konstrukcyjnych należą również stale automatowe (łatwo obrabialne), przeznaczone do toczenia na automatach obróbkowych przy wytwarzaniu masowych ilości elementów (śruby, wkręty, sworznie). Polepszenie skrawalności uzyskuje się dzięki podwyższonej zawartości pierwiastków (P, S i Pb) powodujących kruchość, a przez to łamliwość wióra – przykładowe oznaczenia 11SMn30, 11SMnPb37 wg [PN-EN ISO 683-2:2018-08].

Stale narzędziowe powinny się charakteryzować wysoką twardością, małą ciągliwością i dużą odpornością na ścieranie. Stale narzędziowe niestopowe po obróbce cieplnej (hartowanie i niskie odpuszczanie) wykazują wysoką twardość powyżej 60 HRC, jednak powinny pracować w temperaturze poniżej 200 °C. Klasyfikację stali narzędziowych niestopowych narzędziowych zawarto w tabeli 8.10.

Tabela 8.10. Stale niestopowe narzędziowe [PN-EN ISO 4957:2018-09]

Oznaczenie PN-EN ISO (PN)	Średni skład %			Twardość		Temperatura hartowania
	C	Si	Mn	po wyżar- zaniu HB _{maks.}	po hartowa- niu HRC _{min.}	
C45U (N5)	0,45	0,3	0,7	207	54	810
C70U (N7)	0,70	0,2	0,25	183	57	800
C80U (N8)	0,80			192	58	790
C90U (N9)	0,90			207	60	780
C105U (N10)	1,05			212	61	
C120U (N12)	1,20			217	62	770
Wszystkie stale zawierają do 0,03 % P i S. Hartowane w wodzie i odpuszczane w temp. 180 °C.						

Stale narzędziowe niestopowe utwardzają się poprzez hartowanie na małą głębokość (płytko hartujące się) i dlatego cechuje je duża twardość na powierzchni i znaczna ciągliwość rdzenia, co jest korzystne w czasie ich pracy. Wytwarza się z nich narzędzia, które podczas pracy nie nagrzewają się do temperatury wyższej od zastosowanej podczas odpuszczania, np.: narzędzia pomiarowe, gwintowniki, przecinaki, przebijaki, narzędzia do obróbki drewna, papieru i skóry.

8.2. Część praktyczna

Ćwiczenie polega na zapoznaniu się ze strukturą stali węglowych w powiązaniu z ich właściwościami i zastosowaniem.

8.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Określenie stali węglowej (niestopowej).
2. Wpływ zawartości węgla (w % cięż.) na strukturę i właściwości stali.
3. Wpływ zawartości innych składników (Si, Mn, P, S, N, O, H) na strukturę i właściwości stali.

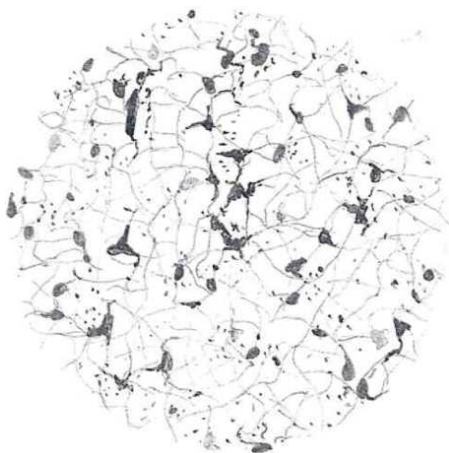
4. Kryteria klasyfikacji stali (zawartość węgla, struktura, stopień odtlenienia, jakość).
5. Podział stali niestopowych ze względu na zastosowanie oraz znakowanie stali niestopowych (wg PN, PN-EN i PN-EN ISO).

8.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

1. Cel ćwiczenia.
2. Wykres wpływu zawartości węgla (w % cięż.) na właściwości stali.
3. Podział ze względu na zastosowanie oraz znakowanie stali węglowych (wg PN, PN-EN i PN-EN ISO).
4. Rysunki, opis mikrostruktur oraz znakowanie stali niestopowych analizowanych na ćwiczeniu.
5. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

8.2.3. Obrazy mikrostruktury

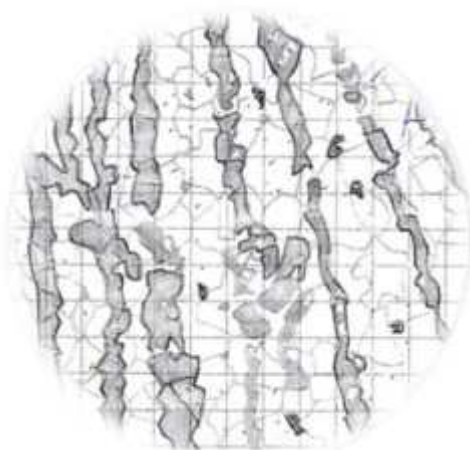
Na rysunkach 8.5-8.11 przedstawiono przykładowe obraz mikrostruktury stali niestopowych. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.



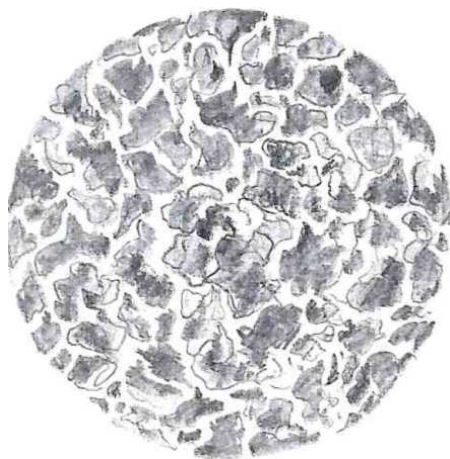
Rys. 8.5. Stal niestopowa automatowa 11SMn30. Struktura ferrytyczno-perlityczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 8.6. Stal niestopowa konstrukcyjna S185. Struktura ferrytyczno-perlityczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



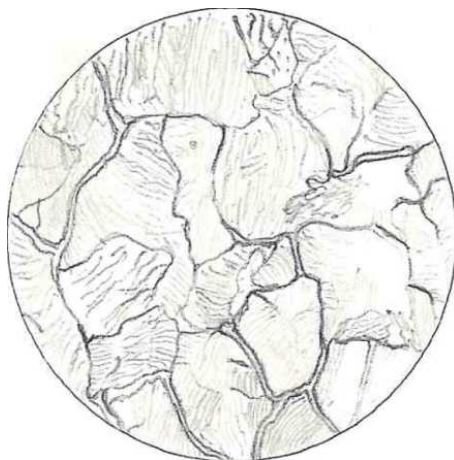
Rys. 8.7. Stal niestopowa konstrukcyjna do nawęglania C20. Struktura pasmowa ferrytyczno-perlityczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



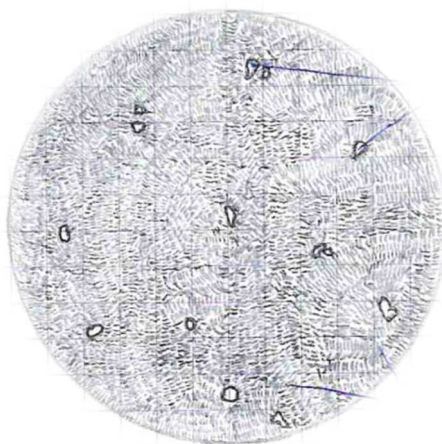
Rys. 8.8. Stal niestopowa konstrukcyjna do ulepszania cieplnego C50. Struktura perlityczno-ferrytyczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 8.9. Stal niestopowa narzędziowa C80U. Struktura perlityczna. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 8.10. Stal niestopowa narzędziowa C105U. Struktura: ziarna perlitu oraz wydzielenia cementytu wtórnego na granicach ziaren. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 8.11. Stal niestopowa narzędziowa C105U po wyżarzaniu zmiękczającym. Struktura: kulkowy/drobny cementyt w osnowie ferrytu. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$

9. Obróbka cieplna stali konstrukcyjnych

9.1. Wprowadzenie

9.1.1. Teoretyczne podstawy obróbki cieplnej

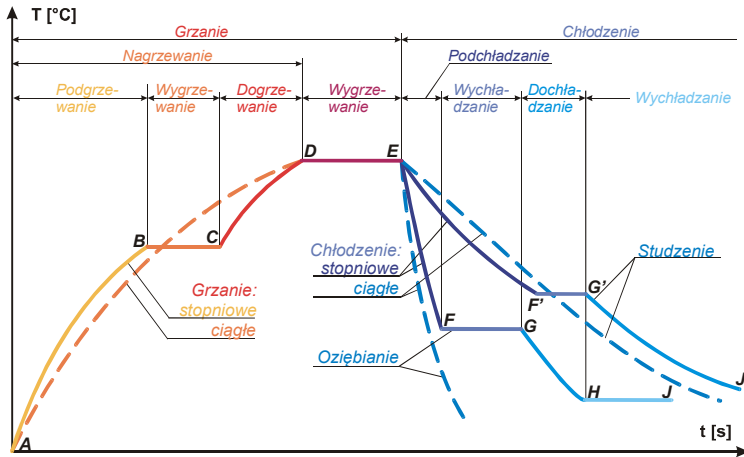
Obróbka cieplna stosowana jest od wielu już setek lat, odkąd zaczęto wyrabiać narzędzia i broń z żelaza. Do końca XIX wieku obróbka cieplna była to praktycznie umiejętność rzemieślnicza, przekazywana pokoleniowo. Dzięki temu, że powstało i rozwijało się metaloznawstwo powstały warunki do naukowego opisu związanego z podstawami obróbki cieplnej. Olbrzymie rozpowszechnienie stopów żelaza z węglem związane jest z ich bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi oraz łatwością przeróbki w stopniu niespotykanym dla innych materiałów. Stale nie miałyby obecnie tak dużego znaczenia, gdyby stosowano je w stanie surowym, tj. bez obróbki cieplnej. Dzięki odmianom alotropowym żelaza można poprzez obróbkę cieplną zmieniać właściwości tych stopów, co znacznie rozszerza obszary ich stosowania.

Obróbka cieplna w znaczeniu ogólnym jest dziedziną technologii obejmującą zespół zabiegów, w wyniku których zmieniają się właściwości fizykochemiczne i mechaniczne metali i stopów, w wyniku zmian ich struktury w stanie stałym poprzez zmiany temperatury w czasie oraz oddziaływanie ośrodka. Nazwy oraz definicje zabiegów obróbki cieplnej opisane są w normie [PN-H-01200:1993].

Operacja obróbki cieplnej jest to część procesu technologicznego, wykonywana w sposób ciągły, zazwyczaj na jednym stanowisku roboczym, np. operacja wyżarzania, hartowania, itp. Zabiegiem obróbki cieplnej jest część, np. nagrzewanie, chłodzenie. Najważniejszymi zabiegami są:

- nagrzewanie – ciągłe lub stopniowe podnoszenie temperatury,
- wygrzewanie – przetrzymanie w temperaturze pośredniej lub docelowej, np. w celu wytworzenia struktury austenitycznej,
- chłodzenie – ciągłe lub stopniowe obniżanie temperatury z małą (studenie) lub dużą (ozębienie) prędkością,
- wychładzanie – przetrzymanie w pośredniej lub docelowej temperaturze chłodzenia.

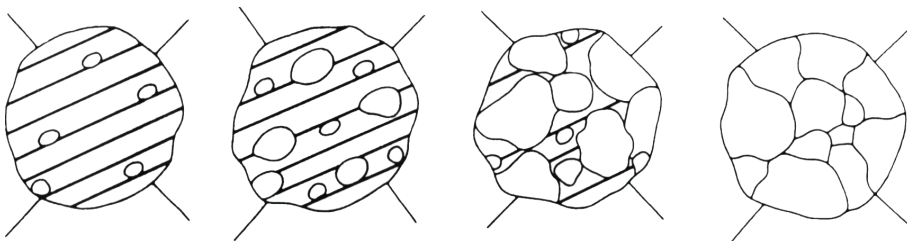
Znaczenie tych pojęć wyjaśniono na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Schemat wyjaśniający znaczenie pojęć zabiegów obróbki cieplnej [PN-H-01200:1993]

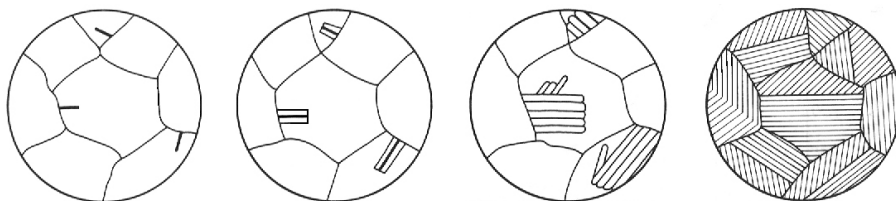
Układy równowagi fazowej stopów, odpowiadają warunkom przy bardzo wolnym nagrzewaniu lub chłodzeniu, nie uwzględniając, jak czas wpływa na przebieg tych przemian zachodzących w stopach. Pomimo tego, można je wykorzystywać do wnioskowania na temat przemian, które zachodzą podczas obróbki cieplnej, nie tylko podczas wolnego, ale również szybkiego nagrzewania, a zwłaszcza szybkiego chłodzenia. Dla obróbki cieplnej stali podstawowe znaczenie ma znajomość układu żelazo-węgiel i przemian zachodzących podczas grzania i chłodzenia.

Gdy stal jest nagrzewana powyżej temperatury A_{c1} dochodzi do przemiany perlitu w austenit. Na granicach między fazami ferryt – cementyt, dochodzi do niejednorodnego zarodkowania austenitu. Jest to przemiana o charakterze dyfuzyjnym, gdyż powstające i rozrastające się zarodki austenitu rozpuszczają w sobie zarówno ferryt i cementyt (rys. 9.2).

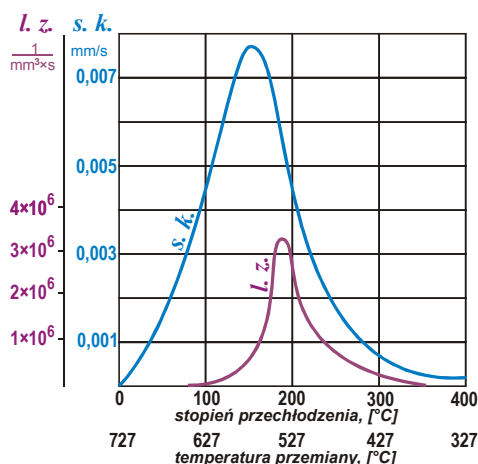


Rys. 9.2. Schemat przedstawiający przemianę perlitu w austenit [Rudn-98]

Stal uprzednio nagrzana do temperatury występowania austenitu w czasie wolnego chłodzenia ulega przemianie austenitu w perlit. Przemiana ta jest procesem dyfuzyjnym, zachodzącym na drodze tworzenia się zarodków i dalszego ich rozrostu. Rozpoczyna się ona od pojawienia się zarodków cementytu na granicy ziaren austenitu, w dalszej kolejności obszary austenitu o małej koncentracji węgla ulegają przemianie na ferryt. Powstałe płytki cementytu i ferrytu rozrastają się jednocześnie w głąb ziarna austenitu (rys. 9.3).



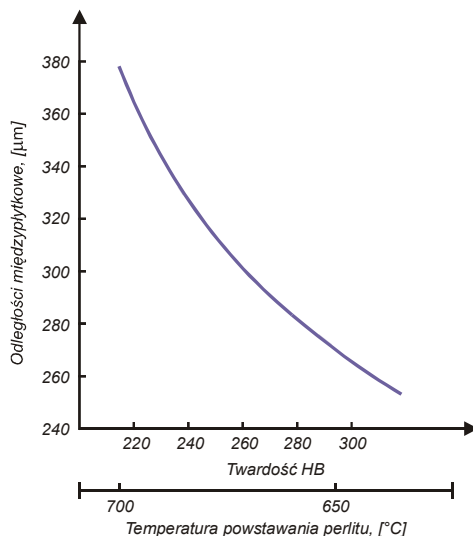
Rys. 9.3. Schemat przemiany austenitu w perlit [Wend-76]



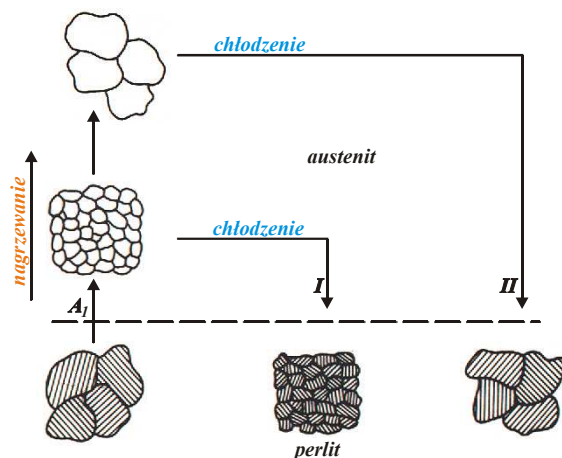
Rys. 9.4. Zależność liczby zarodków krystalizacji (l.z.) i liniowej szybkości krystalizacji (s.k.) od stopnia przechłodzenia austenitu [Gula-88]

Liniowa szybkość krystalizacji (s.k.) oraz liczba zarodków krystalizacji (l.z.) zależą od stopnia przechłodzenia austenitu. Maksymalne wartości osiągają one w zakresie temperatury odpowiadającej minimalnej trwałości austenitu, tj. około 550° - 600°C (rys. 9.4). Z tego też względu ze stopniem przechłodzenia austenitu zmienia się również budowa powstającego perlitu. W temperaturze

bliskiej A_{r1} tworzy się perlit grubopłytkowy, natomiast w miarę obniżania temperatury przemiany – perlit drobnopłytkowy. Przy wzroście stopnia dyspersji podwyższeniu ulegają właściwości wytrzymałościowe perlitu (rys. 9.5).



Rys. 9.5. Zależność twardości perlitu i odległości międzypłytkowych od temperatury przemiany [Weso-81]



Rys. 9.6. Schemat przedstawiający zmianę wielkości ziarn stali eutektoidalnej przy nagrzewaniu do temperatury powyżej A_{c1} oraz chłodzenia [Weso-81]

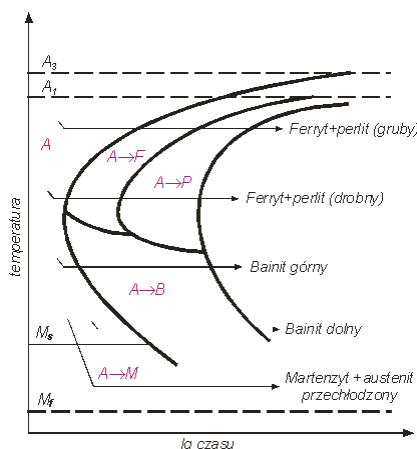
Podczas przemiany perlit w austenit dochodzi do rozdrobnienia ziaren. Średnia wielkość ziaren powstałego austenitu jest mniejsza od wielkości wyjściowej wielkości ziaren perlitu. Natomiast podczas chłodzenia austenitu praktycznie nie do rozdrobnienia ziaren nie dochodzi. Przy powolnym chłodzeniu wielkość ziaren nowo utworzonego perlitu jest porównywalna do wielkości z pierwotnego austenitu (rys. 9.6, rys. 9.13a).

Na wykresach CTP (czas – temperatura – przemiana) zawarte są ilościowe informacje odnośnie zależności struktury oraz właściwości stali od temperatury i czasu przemiany przechłodzonego austenitu.

W zależności od przebiegu chłodzenia dla wyróżnia się wykresy:

- CTP_i – przy izotermicznym chłodzeniu (rys. 9.7),
- CTP_c – przy chłodzeniu ciągłym – anizotermiczne (rys. 9.8).

Widoczna na tych wykresach M_s oznacza temperaturę początku, a M_f temperaturę końca przemiany martenzytycznej.

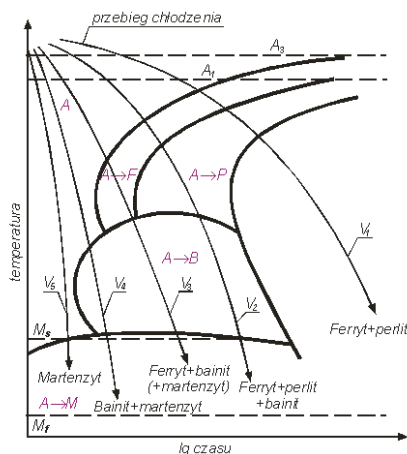


Rys. 9.7. Wykres izotermicznych przemian przechłodzonego austenitu CTP_i dla stali podeutektoidalnej [Weso-81]

Wykresy CTP_i stanowią podstawę do ustalania:

- temperatury i czasu wyżarzania izotermicznego,
- temperatury kąpeli chłodzącej i czasu chłodzenia przy hartowaniu z przemianą izotermiczną,
- temperatury i czasu chłodzenia w gorącej kąpeli przy hartowaniu stopniowym,
- krytycznej prędkości chłodzenia V_k ,

- temperatury i czasu odkształcania podczas obróbki cieplno-mechanicznej niskotemperaturowej.



Rys. 9.8. Wykres anizotermicznych przemian przechłodzonego austenitu CTP_c dla stali podeutektoidalnej [Weso-81]

Wykresy CTP_c stosuje się przy ustalaniu:

- prędkości chłodzenia i końcowej temperatury regulowanego chłodzenia przy wyżarzaniu zupełnym na założoną twardość,
- struktury i twardości po normalizowaniu w funkcji wielkości przekroju (prędkości chłodzenia),
- zależności struktury i twardości od prędkości chłodzenia podczas hartowania zwykłego.

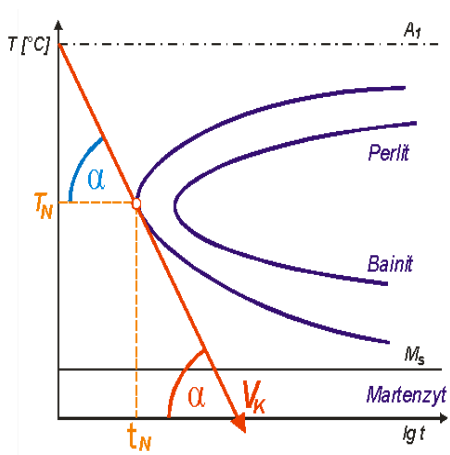
Krytyczna prędkość chłodzenia V_k (rys. 9.9) – jest to najmniejsza prędkość chłodzenia warunkująca powstanie struktury wyłącznie martenzytycznej, można ją wyznaczyć z zależności:

$$V_k = \frac{A_1 - T_N}{0,67 \times t_N} \quad (9.1)$$

W stalach nagrzanym do temperatury austenitowania, w trakcie ich wolnego chłodzenia dochodzi do przemian zgodnie z układem równowagi fazowej żelazo – Fe₃C. Stosowane w praktyce znacznie wyższe prędkości chłodzenia powodują przesunięcie przemian do niższej temperatury. W czasie chłodzenia austenitu, w zależności od prędkości chłodzenia oraz temperatury przechłodzenia, zachodzą przemiany:

- perlityczna (opisana wcześniej),
- bainityczna,

- martenzytyczna.



Rys. 9.9. Graficzne przedstawienie krytycznej prędkości chłodzenia [Prow-00]

Przemiana martenzytyczna zachodzi przy dużym przechłodzeniu austenitu do temperatury M_s (początku przemiany) podczas chłodzenia z prędkością większą od krytycznej V_k . W wyniku takiej przemiany powstaje przesycony roztwór węgla w żelazie α , czyli martenzyt (rys. 9.14b).

Główne cechy przemiany martenzytycznej:

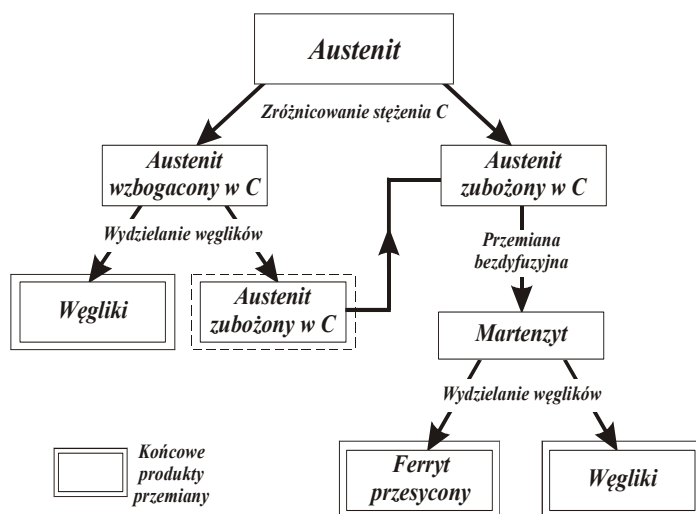
- jest bezdyfuzyjna,
- temperatura początku M_s nie zależy od prędkości chłodzenia,
- zachodzi podczas obniżania temperatury w zakresie od M_s do M_f ,
- postępuje poprzez tworzenie się coraz to nowych igieł martenzytu,
- istnieje wzajemne ukierunkowanie struktury martenzytu względem ziaren austenitu,
- bywa odwracalna w stopach nieżelaznych, w stalach jest praktycznie nieodwracalna,
- proces przemiany zostaje zahamowany poprzez rosnące naprężenia ścisiskające w austenicie,
- naprężenia rozciągające oraz odkształcenia plastyczne ułatwiają przemianę martenzytyczną.

Przemiana bainityczna wykazuje zarówno cechy przemiany martenzytycznej (bezdyfuzyjnej) oraz perlitycznej (dyfuzyjnego przemieszczania węgla). Powstający w wyniku tej przemiany bainit jest mieszaniną przesyconego wę-

glem ferrytu oraz dyspersyjnych węglików. Z zależności od temperatury, w której zachodzi przemiana, powstaje:

- bainit górny, składający się z bardzo drobnych cząstek cementytu wydzielonych w nieznacznie przesyconym w węgiel ferrycie o budowie pierzastej, o twardości $40 \div 46$ HRC. Zakres temperatury powstawania $550 \div 450^\circ\text{C}$,
- bainit dolny, składający się z bardzo drobnych cząstek cementytu wydzielonych wzdłuż określonych płaszczyzn krystalograficznych z przesyconego w węgiel ferrytu o budowie iglastej, o twardości $46 \div 58$ HRC. Zakres temperatury powstawania $450^\circ\text{C} \div M_s$.

Schemat przemiany bainitycznej przedstawiono na rys. 9.10.



Rys. 9.10. Schemat przemiany bainitycznej [Dobr-02]

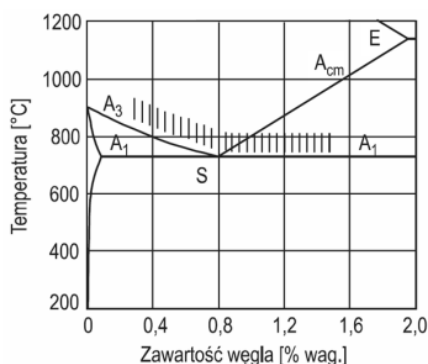
Rodzaje struktury powstającej w wyniku chłodzenia stali od temperatury austenitowania oraz ich twardości przedstawiono w tabeli 9.1.

9.1.2. Hartowanie

Hartowanie to rodzaj obróbki cieplnej polegający na wygrzewaniu stali w temperaturze występowania austenitu, tj. $(30-50)^\circ\text{C}$ powyżej temperatury A_3 dla stali podutektoidalnych oraz $(30-50)^\circ\text{C}$ powyżej temperatury A_{123} dla stali nadutektoidalnych (rys. 9.11), następne oziębienie z prędkością pozwalającą na uzyskanie struktury martenzytycznej lub bainitycznej. Czas wygrzewania musi być dostatecznie długi, by cementyt mógł rozpuścić się w austenicie. Warunkiem zahartowania stali jest dostateczna zawartość węgla $C > 0,3\%$.

Tabela 9.1. Rodzaje struktury powstającej w wyniku chłodzenia stali od temperatury austenitowania

Nazwa struktury	Przybliżony zakres temperatury powstawania [°C]	Przybliżona twardość	
		HB	HRC
Perlit grubopłytkowy	$A_1 \div 650$	180 ÷ 280	-
Perlit drobnopłytkowy	650 ÷ 550	280 ÷ 380	30 ÷ 40
Bainit górny	550 ÷ 450	380 ÷ 450	40 ÷ 46
Bainit dolny	450 ÷ M_s	450 ÷ 600	46 ÷ 59
Martenzyt	$M_s \div M_f$	600 ÷ 670	59 ÷ 65

**Rys. 9.11.** Zakres temperatury nagrzewania do hartowania stali [Wend-76]

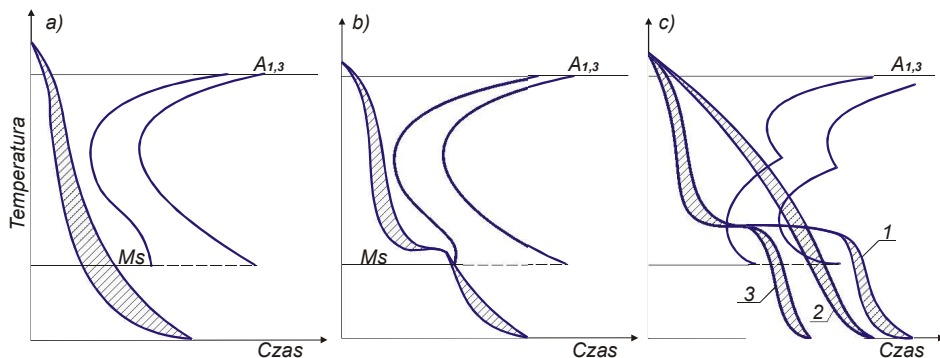
Hartowanie martenzytyczne (na strukturę martenzytyczną) zależnie od sposobu oziębiania rozróżnia się:

- zwykłe – oziębianie ciągłe w ośrodku o temperaturze niższej od M_s (rys. 9.12a),
- stopniowe – pierwszy stopień oziębiania do temperatury wyższej od M_s , w czasie niezbędnym do oziębiania w całym przekroju, lecz nie dłużej od czasu trwałości austenitu; drugi stopień oziębiania do temperatury otoczenia w powietrzu (rys. 9.12b).

Hartowanie bainityczne (na strukturę bainityczną); zależnie od sposobu oziębiania, rozróżnia się (rys. 9.12c):

- zwykłe (z oziębianiem ciągłym),

- z przemianą izotermiczną (z oziębianiem w kąpeli o temperaturze wyższej od M_s i wytrzymaniem w czasie do prawie całkowitego ukończenia przemiany bainitycznej).



Rys. 9.12. Sposoby hartowania: a) martenzytyczne zwykłe, b) martenzytyczne stopniowe, c) bainityczne: 1 – z przemianą izotermiczną, 2 – zwykłe, 3 – martenzytyczno - bainityczne [Stau-79]

Hartowanie objętościowe – to hartowanie, w którym austenityzowanie zachodzi w całej objętości przedmiotu, a grubość zahartowanej warstwy zależna jest od hartowności danego materiału oraz prędkości chłodzenia.

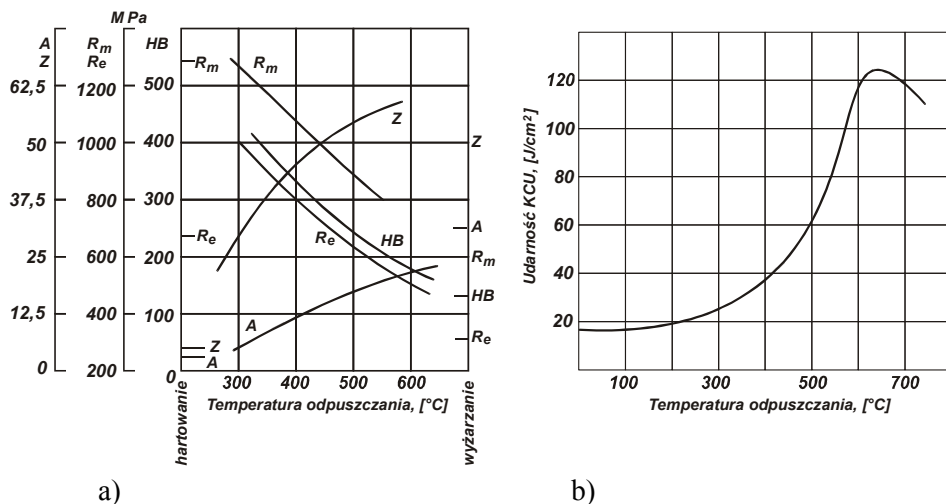
Hartowanie powierzchniowe – hartowanie z szybkim nagrzewaniem (indukcyjnym, płomieniowym lub kąpielowym) tylko wierzchniej warstwy materiału. Zalety hartowania powierzchniowego:

- możliwość zastosowania do przedmiotów o niemal dowolnym kształcie i rozmiarze,
- otrzymanie twardej warstwy powierzchniowej o określonej grubości przy zachowaniu ciągliwego rdzenia,
- wyeliminowanie krzywienia się,
- duża wydajność procesu.

9.1.2. Odpuszczanie

Odpuszczanie – grzanie uprzednio zahartowanego przedmiotu do temperatury niższej od A_{cl} , wygrzanie w tej temperaturze i następnie najczęściej powolne chłodzenie do temperatury otoczenia.

Na rysunku 9.13. przedstawiono wpływ temperatury odpuszczania na właściwości mechaniczne, plastyczne oraz udurowienie stali uprzednio zahartowanej, zawierającej 0,4% C.

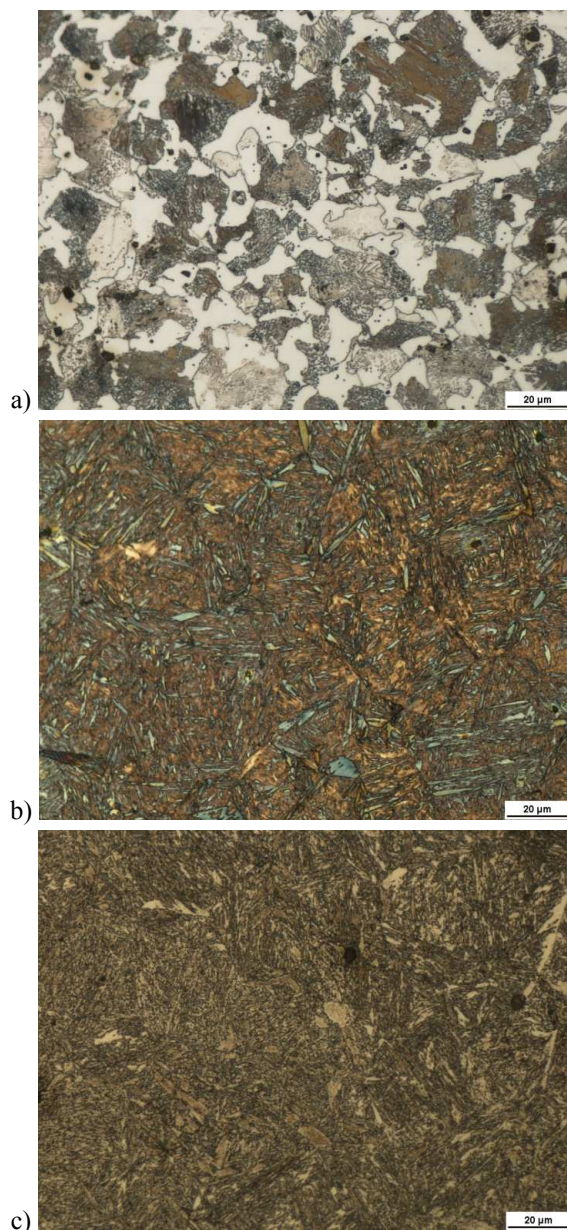


Rys. 9.13. Wpływ temperatury odpuszczania na właściwości mechaniczne i plastyczne (a) oraz uduarność (b), stali niestopowej, uprzednio zahartowanej, zawierającej 0,4% C [Weso-81]

Zależnie od zakresu temperatury, rozróżnia się odpuszczanie:

- niskie, w zakresie (150÷250) °C – celem jest usunięcie naprężeń hartowniczych oraz rozkład austenitu szczątkowego przy zachowaniu wysokiej twardości. Stosowane do narzędzi, sprawdzianów, przedmiotów nawęglonych, narzędzi skrawających, elementów łożysk tocznych, itp.
- średnie, w zakresie (250÷500) °C – celem jest obniżenie twardości i zwiększenie odporności na uderzenia przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości i sprężystości. Znajduje zastosowanie przy obróbce cieplnej sprężyn, matryc, resorów, itp.
- wysokie, w zakresie (500÷650) °C – stosowane jest w celu uzyskania jak najwyższej uduarności przy wystarczającej wytrzymałości na rozciąganie. Istotna jest zwłaszcza wysoka wartość stosunku R_e/R_m . W wyniku tego odpuszczania otrzymuje się strukturę sorbityczną ((kulisty cementyt o dużej dyspersji w osnowie ferrytu)), właściwą dla stali konstrukcyjnych w stanie ulepszonym cieplnie (rys. 9.14c).

Na rysunku 9.14 przedstawiono strukturę stali C55 (konstrukcyjnej niestopowej do ulepszania cieplnego) po wyżarzaniu normalizującym, po objętościowym hartowaniu zwykłym w wodzie oraz po odpuszczaniu wysokim.



Rys. 9.14. Stal niestopowa konstrukcyjna do ulepszania cieplnego C55: a) w stanie wyjściowym (po wyżarzaniu normalizującym) – struktura perlityczno-ferrytyczna oraz wtrącenia niemetaliczne; b) po objętościowym hartowaniu zwykłym w wodzie – struktura: martenzyt iglasty oraz austenit szczątkowy; c) po odpuszczaniu wysokim – struktura sorbitu. Zgłady trawione: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

9.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest przeprowadzenie zabiegu hartowania i odpuszczania stali, określenie parametrów poszczególnych zabiegów (temperatura, czas wygrzewania, ośrodek chłodzący) oraz zapoznanie się ze strukturą stali po hartowaniu i odpuszczaniu.

9.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Stale konstrukcyjne węglowe (niestopowe) i stopowe do ulepszania cieplnego.
2. Przemiany w stali przy nagrzewaniu (przemiana perlit - austenit). Rozdrobnienie i rozrost ziarna.
3. Przemiana austenit-perlit przy chłodzeniu stali. Krzywe izotermicznego rozpadu austenitu (CTP_i). Krytyczna prędkość chłodzenia (V_k).
4. Przemiana austenit-martenzyt. Cechy przemiany martenzytycznej. Austenit szczątkowy.
5. Dobór zakresu temperatury austenitizacji przy hartowaniu stali węglowych.
6. Przemiany przy odpuszczaniu. Rodzaje odpuszczania (zakresy temperatury, zmiany struktury i właściwości stali).
7. Cel i sposób wykonania ulepszania cieplnego. Właściwości stali po ulepszaniu cieplnym.

9.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać

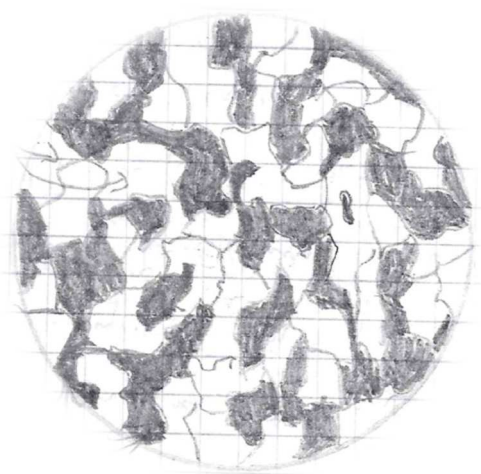
1. Fragment układu Fe-Fe₃C z zaznaczonym zakresem temperatury austenitizacji podczas hartowania stali węglowych.
2. Rodzaje odpuszczania stali (zakresy temperatury, zmiany struktury i właściwości).
3. Dane dotyczące użytej stali, parametry obróbki cieplnej, wyniki pomiarów twardości (tabela 9.2).
4. Rysunki i opis struktury stali badanych na zajęciach.
5. Analiza wyników i wnioski.

9.2.3. Obrazy mikrostruktury

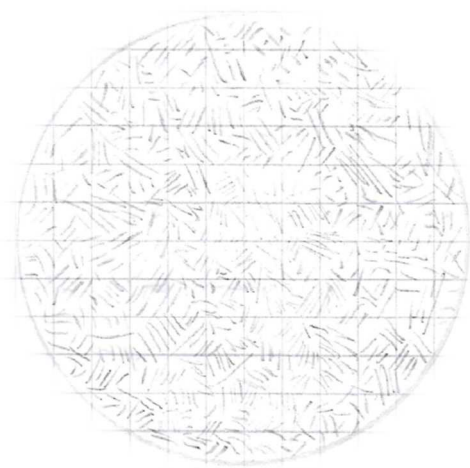
Na rysunkach 9.15-9.18 przedstawiono przykładowe obraz mikrostruktury stali konstrukcyjnych po obróbce cieplnej. Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.

Tabela 9.2. Wyniki pomiaru twardości

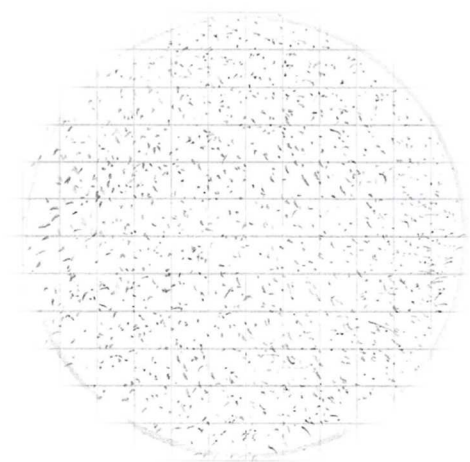
Stan materiału	Twardość				
	HRB/HRC				HB
	1	2	3	Wartość średnia	
Wyjściowy					
Po hartowaniu					
Po odpuszczaniu					



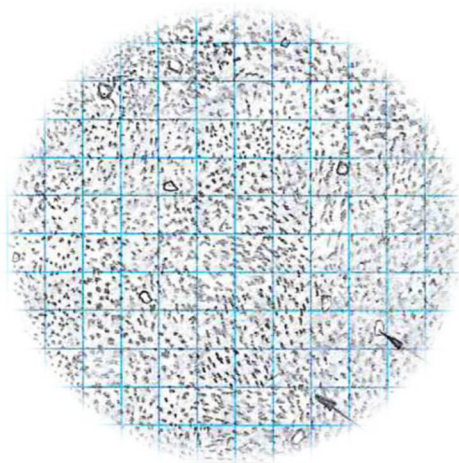
Rys. 9.15. Stal niestopowa konstrukcyjna do ulepszania cieplnego C55 w stanie wyjściowym (po wyżarzaniu normalizującym) – struktura perlityczno-ferrytyczna oraz wtrącenia niemetaliczne. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 9.16. Stal niestopowa konstrukcyjna do ulepszania cieplnego C55 po hartowaniu w wodzie – struktura martenzytu iglastego. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 9.17. Stal niestopowa konstrukcyjna do ulepszania cieplnego C55 po odpuszczaniu wysokim. Struktura: sorbit – kulisty cementyt o dużej dyspersji w osnowie ferrytu. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 9.18. Stal 41Cr4 stopowa konstrukcyjna po ulepszeniu cieplnym. Struktura: węgliki stopowe o dużej dyspersji w osnowie ferrytu stopowego. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$

10. Struktura stali stopowych oraz biomateriałów metalowych

10.1. Wprowadzenie

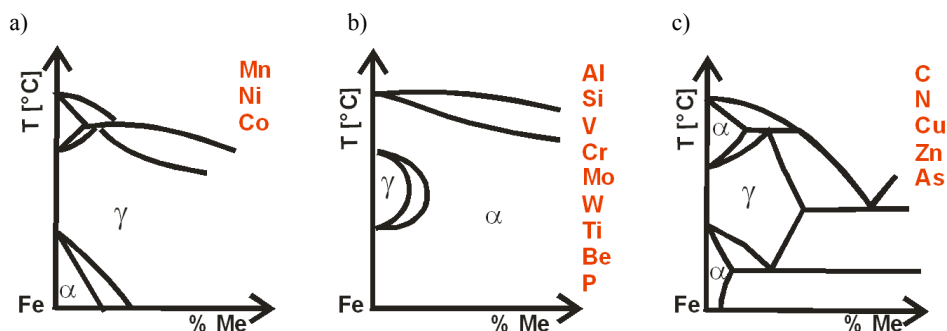
10.1.1. Stale stopowe – wiadomości podstawowe

Stal stopowa jest to obrobiony plastycznie i cieplnie obrabialny techniczny stop żelaza z węglem zawierający poniżej 2,11 %C, otrzymywany w procesach stalowniczych ze stanu ciekłego, zawierający oprócz węgla również inne pierwiastki, powyżej wartości podanych w normie PN-EN 10020:2003, dodawane w celu otrzymania określonych właściwości.

Stale stopowe w niektórych przypadkach mogą być bezwęglowe lub zawierać nawet powyżej 2,11 %C. Znaczenie pierwiastków stopowych jest bardzo duże. Dodatki stopowe wprowadzone do żelaza mogą zmieniać jego właściwości w szerokim zakresie. Każdy pierwiastek zmienia określoną właściwość w charakterystyczny dla niego sposób, przy czym zmiana ta jest zależna od ilości dodatku stopowego. W zależności od koncentracji oraz rodzaju pierwiastków stopowych właściwości stali w znacznym stopniu zależą od postaci fazy w jakiej pierwiastki te występują:

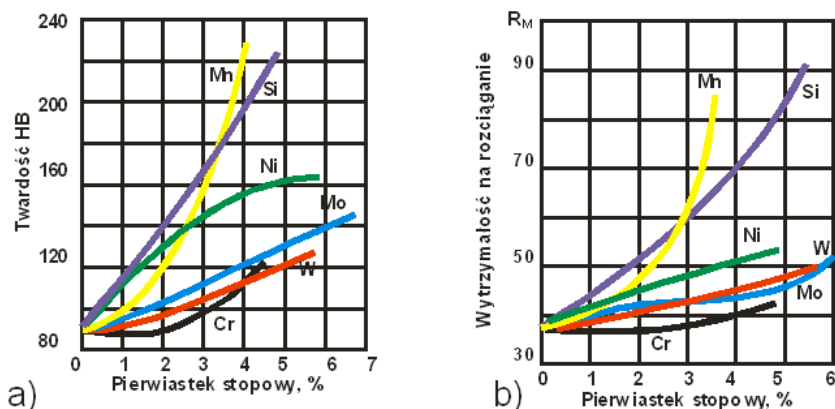
- roztwory – rozpuszczają się w ferrycie lub austenicie,
- fazy międzywęzłowe – tworzą węgliki, azotki lub węglikoazotki,
- fazy międzymetaliczne – łącząc się z żelazem lub z innymi dodatkami,
- wtrącenia niemetaliczne – tworzą związki z domieszkami lub zanieczyszczeniami (tlenki, siarczki),
- stan wolny czystego pierwiastka – nie rozpuszczają się w osnowie lub ich rozpuszczalność jest bardzo niska, nie reagują również ze składnikami stopu.

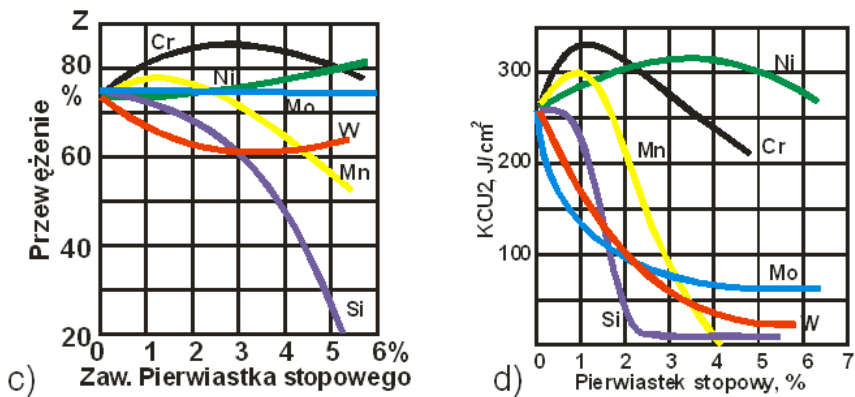
Żelazo tworzy roztwory stałe międzywęzłowe z węglem i azotem oraz roztwory substytucyjne z pierwiastkami dodatków stopowych o zbliżonych promieniach atomowych, które wpływają na kształt układu żelazo-cementyt – rysunek 10.1. Przy odpowiednio dużej zawartości Ni, Mn lub Co jedyną stabilną fazą w całym zakresie stanu stałego jest austenit (rys. 10.1a). W przypadku odpowiednio dużej zawartości pierwiastków tworzących wykresy z zamkniętym polem austenitu (rys. 10.1b) jedyną fazą stabilną, w całym zakresie stanu stałego jest ferryt. Jest to typ charakterystyczny dla pierwiastków węglilotwórczych (Cr, Mo, W, V, Ti) oraz ferrytotwórczych (Si, Al, P). Powstawać też mogą układy z rozszerzonym polem austenitu – z Ta i Nb oraz z B, Zr i Ce (rys. 10.1c).



Rys. 10.1. Typy układów równowagi stopów żelaza z różnymi pierwiastkami (Me) stopowymi: a) z otwartym polem austenitu, b) z zamkniętym polem austenitu, c) z rozszerzonym zakresem austenitu [Przy-07]

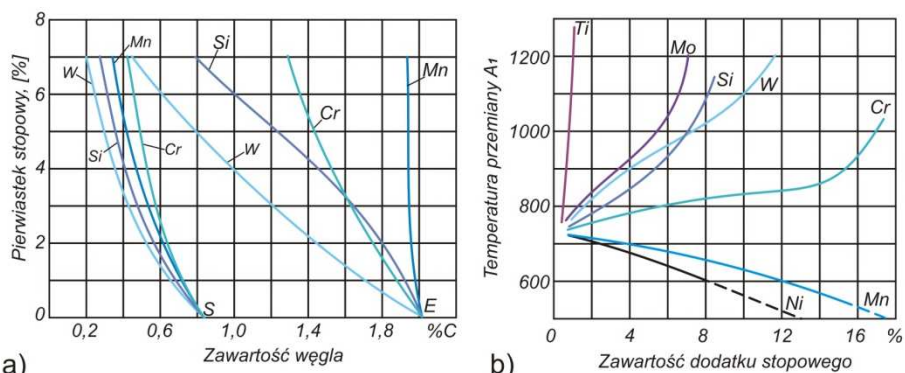
Pierwiastki stopowe znajdujące się w roztworach stałych wpływają na właściwości mechaniczne stali stopowych poprzez oddziaływanie na fazy w nich występujące – rysunek 10.2. Krzem i mangan najsilniej utwardzają ferryt, a przy tym do zawartości 1 % nie zmniejszają uduchoty. Nikiel jednocześnie zwiększa wytrzymałość i uduchoty. Właściwości mechaniczne stali stopowych są zazwyczaj wyższe od stali węglowych, ponieważ ferryt stopowy ma wyższe cechy mechaniczne (rys. 10.2ab), ilość perlitu przy tej samej zawartości węgla jest wyższa (rys. 10.2a) a struktura stali stopowych jest na ogół bardziej drobnoziarnista.





Rys. 10.2. Wpływ dodatków stopowych na właściwości ferrytu: a) twardość, b) granica wytrzymałości na rozciąganie, c) przewodzenie, d) uderność [Przy-07]

Dodanie do stopu żelaza z węglem pierwiastków stopowych powoduje przesunięcie charakterystycznych punktów (S i E) w układzie równowagi fazowej Fe-Fe₃C, co jest istotne przy doborze temperatury obróbki cieplnej, a jednocześnie ma wpływ na strukturę stopu. Większość pierwiastków stopowych przesuwa te punkty w lewo do niższych zawartości węgla – rysunek 10.3a. Oznacza to, że po wprowadzeniu do stali podutektoidalnej jednego z tych pierwiastków otrzymamy mniej ferrytu, a do stali nadutektoidalnej – więcej cementytu wtórnego. Na podstawie wykresu 10.3b można przewidzieć, czy wprowadzenie do stali określonego pierwiastka wymaga podniesienia bądź obniżenia temperatury austenitizowania stali.

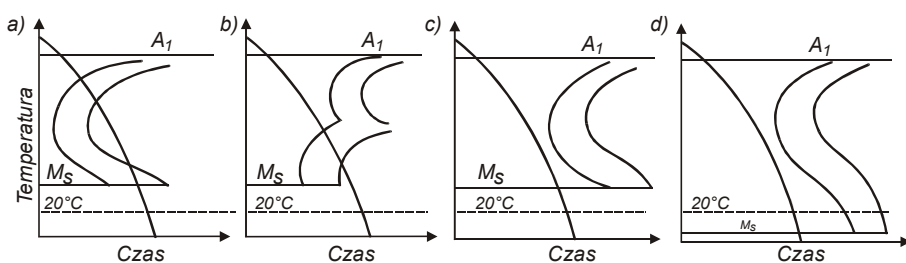


Rys. 10.3. Oddziaływanie pierwiastków stopowych na: a) zawartość węgla w charakterystycznych punktach (S i E) układu Fe-Fe₃C, b) temperaturę przemiany eutektoidalnej stali [Przy-07]

Struktura stali stopowych po przyspieszonym chłodzeniu (na powietrzu), w zależności od typu wykresu CTP_i (rys. 10.4) może być:

- ferrytyczna – przy bardzo niskiej zawartości węgla i znacznej zawartości pierwiastków ferrytotwórczych (powyżej 10,5% Cr),
- perlityczna – gdy koncentracja pierwiastków stopowych jest niska i austenit wykazuje małą trwałość w zakresie perlitycznym,
- bainityczna – gdy w zakresie przemiany perlitycznej trwałość austenitu jest wysoka, a w zakresie przemiany bainitycznej niska,
- martenzytyczna – przy wyższej koncentracji pierwiastków stopowych, które zwiększają trwałość austenitu, ale nie wpływają na obniżenie temperatury początku przemiany martenzytycznej (M_s) poniżej temperatury pokojowej,
- austenityczna – przy dużej trwałości austenitu oraz gdy temperatura M_s występuje poniżej temperatury pokojowej (np. stal zawierająca 18 % Cr i 8 % Ni),
- w stalach stopowych występować też może struktura ledeburytowa (perlit i ledeburyt) – powstaje, gdy stal posiada wysoką zawartość węgla i węglilotwórczych pierwiastków stopowych, które powodują przesunięcie punktu E w lewo – w kierunku mniejszej zawartości węgla (rys. 10.3a).

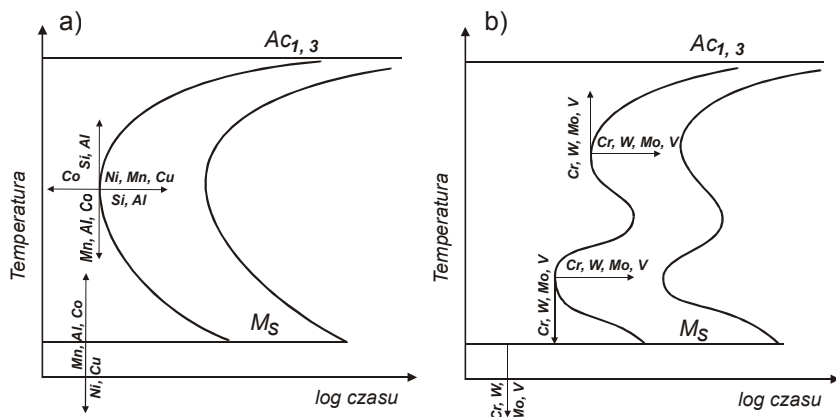
Wpływ dodatków stopowych, jakim podlega przechłodzony austenit, uwidacznia się wyraźnie na wykresach CTP_i – powodują one zmianę zarówno kształtu, jak i położenia linii odpowiadających poszczególnym przemianom (rys. 10.4 i 10.5).



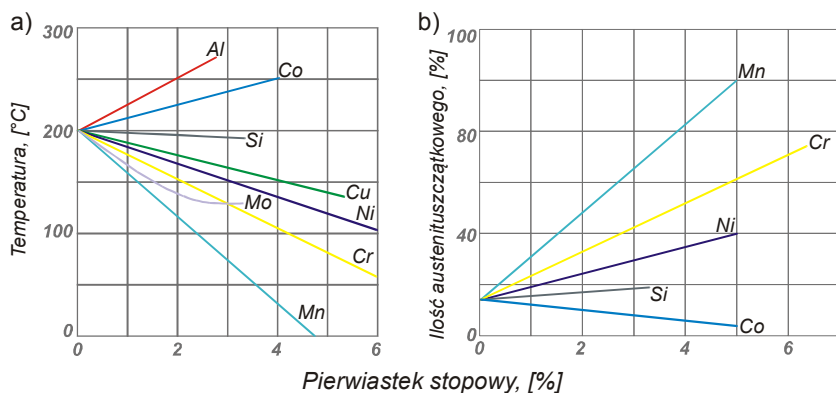
Rys. 10.4. Klasyfikacja stali stopowych, w stanie wolno chłodzonym, wg struktury na podstawie wykresów CTP_i: a) perlitycznej, b) bainitycznej, c) martenzytycznej, d) austenitycznej [Wend-76]

Pierwiastki nietworzące węglików nie zmieniają kształtu linii początku i końca przemiany austenitu na wykresach CTP_i, a jedynie przesuwają je

w prawo (rys. 10.5a). Zwiększają one zatem trwałość przechłodzonego austenitu i zmniejszają szybkość jego przemiany. Wyjątek stanowi kobalt, który przyspiesza przemianę austenitu. Pierwiastki węglotwórcze powodują, że zakresy przemiany perlitycznej i bainitycznej rozsuwają się, jednocześnie zwiększają czas trwałości austenitu (rys. 10.5b). Stale stopowe mogą mieć, w zależności od zawartości węgla i dodatków stopowych, strukturę perlityczną, bainityczną, martenzytyczną lub austenityczną.



Rys. 10.5. Wpływ dodatków stopowych na krzywe CTP_i [Pro-00]



Rys. 10.6. Wpływ dodatków stopowych na temperaturę M_s początku przemiany martenzytycznej (a) oraz ilość austenitu szcążkowego (b) [Weso-81]

Ważny jest także wpływ dodatków stopowych na temperaturę początku M_s i końca M_f przemiany martenzytycznej (rys. 10.6a), ponieważ od niej zależy

zarówno ilość austenitu szczątkowego (rys. 10.6b), jak i skłonność stali do pękania podczas hartowania.

Węgiel tworzy z metalami przejściowymi grup IVA-VIIA, w tym również z żelazem, węgliki (fazy międzywęzłowe). Skłonność pierwiastków stopowych do tworzenia węglików jest związana ze strukturą elektronową ich atomów, a w szczególności ze stopniem wypełnienia elektronami podpoziomu d . Im bardziej w lewo od żelaza zajmuje miejsce dany pierwiastek węglilotwórczy w układzie okresowym, tym mniej jest wypełniony elektronami podpoziom energetyczny d i tym jego powinowactwo do węgla jest większe, a powstały węgiel bardziej stabilny. Pierwiastki, w kolejności, według wzrastającej zdolności do tworzenia węglików to: Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Zr, Nb. Pierwiastki stopowe nietworzące węglików w stali to: Ni, Co, Si, Al., Cu, Zn, Ag.

Gdy stosunek promienia atomu węgla ($0,79 \text{ \AA}$) do atomu pierwiastka węglilotwórczego ($> 1 \text{ \AA}$) jest $< 0,59$, to wtedy sieci węglików tworzą tzw. fazy międzywęzłowe o prostej sieci krystalicznej. Gdy stosunek ten jest $> 0,59$, to wtedy powstają struktury złożone sieci węglików zazwyczaj o znacznej liczbie atomów w komórce – tabela 10.1. Węgliki stopowe nie występują jednak w postaci prostej, przeważnie zawierają one w roztworze żelazo, a gdy w skład stali wchodzi kilka dodatków stopowych, również i te pierwiastki. Ponadto węgliki o tym samym typie wzoru stechiometrycznego (izomorficzne) mogą się wzajemnie rozpuszczać (np. Fe_3C i Mn_3C). Rozpuszczalność węglików złożonych jest znacznie łatwiejsza, np. $(\text{Cr,Fe,Mn})_{23}(\text{C,N})_6$.

Tabela 10.1. Struktura i właściwości niektórych węglików stopowych [Wend-76]

Struktura krystaliczna	Sieć elementarna	Węgliki	Wzór ogólny (M – metal)	Mikrotwardość HV kG/mm^2	Przybliżona temp. topnienia, $^{\circ}\text{C}$
Prosta	Regularna typu NaCl	TiC , VC , ZrC , NbC	MC	$1800 \div 3200$	$2800 \div 3875$
	Typ A3	Mo_2C , MoC , W_2C , WC , Fe_2C	MC lub M_2C	$1600 \div 2200$	Ponad 2800
Złożona	Układ rombowy lub regularny złożony	Fe_3C , Mn_3C , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6	M_3C , M_{23}C_6 , M_7C_3	$840 \div 2100$	$1520 \div 1665$

Oddziaływanie dodatków stopowych na przemianę austenitu zależy od ich rzeczywistej zawartości w austenicie. Z tego względu pierwiastki węglilotwórcze zwiększają trwałość przechłodzonego austenitu jedynie w przypadku,

gdy zostały w nim w czasie austenitzacji całkowicie rozpuszczone. Jeżeli natomiast występują one w postaci trwałych węglików złożonych, to może nastąpić nawet skutek przeciwny – tj. zmniejszenie trwałości przechłodzonego austenitu dlatego, że skutkiem obecności węglików austenit jest uboższy zarówno w dodatki stopowe, jak i w węgiel. Ponadto węgliki, odgrywając rolę zarodków krystalicznych, sprzyjają zwiększeniu szybkości przemiany austenitu.

Fazy międzymetaliczne pojawiają się w stalach wysokostopowych i stopach nie zawierających żelaza lub zawierających ten pierwiastek w niedużych ilościach. Najczęściej są to:

- fazy sigma – występują w stopach Fe-Cr (przy zawartości 43÷50 % Cr, poniżej 800 °C), fazy Fe-Mo i Fe-V – powodują kruchość stali,
- fazy Lavesa – powstają w metalach przejściowych przy różnicy średnic atomowych w granicach 6÷40 % – w stopach żelaza spotyka się fazy: Fe₂Ti, Fe₂Nb, Fe₂Zr.

W stopach żelaza utwardzonych wydzieleniowo występują fazy o ogólnym wzorze AB₃ - np. Ni₃Al, która wydziela się przy odpuszczaniu martenzytycznych stali nierdzewnych, lub Ni₃Mo, która powstaje podczas starzenia martenzytu w stalach typu maraging. Rozpuszczalność pierwiastków stopowych w żelazie i ich związki występujące w stopach Fe-C scharakteryzowano w tabelach 10.2 i 10.3.

Tabela 10.2. Rozpuszczalność pierwiastków stopowych w żelazie występujących w stopach Fe-C [Weso-81]

Pierwia- stek	Rozpuszczalność					
	W żelazie γ		20°C %	W żelazie α		20°C %
	max			max		
	%	°C		%	°C	
C	2,11	1148	-	0,0218	727	0,008
Mn	~65	>900	>30	~17	20	~17
Si	2,0	~1200	-	18,5	1030	14,5
P	~0,5	~1200	>25	2,8	1050	0,9
Ni	nieogran.	>900	-	~25	20	~25
Cr	13	~1000	-	nieogran.	>900	~28
Mo	3,0	~1200	-	37	1450	5
V	1,0	~1100	-	nieogran.	>1200	~18
Ti	0,7	~1100	-	6,5	1310	~2
W	3	~1200	-	33	1520	~6
Co	nieogran.	~1000	>89	76	20	76
Al	1,1	~1100	-	3,6	~1100	3~12,5
Cu	~8	1094	-	1,4	850	0,4

Tabela 10.3. Pierwiastki stopowe i ich związki występujące w stopach Fe-C [Stau-79]

Pierwia- stek	węgliki	związki międzymetaliczne			azotki	tlenki i siarczki
		wzór	oznaczenie	% Me		
C	Fe ₃ C	-	-	-	-	-
Mn	Mn ₂₃ C ₆	-	-	-	Mn ₄ N	MnO
	Mn ₇ C ₃				Mn ₂ N	MnS
	Mn ₃ C ₂					
Si	-	FeSi	ε	33,5	-	SiO ₂
P	-	Fe ₃ P	ε	15,6	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-
Cr	Cr ₂₃ C ₆	FeCr	σ	48	CrN	Cr ₂ O ₃
	Cr ₇ C ₃				Cr ₂ N	
	Cr ₃ C ₂					
Mo	Mo ₂ C	Fe ₃ Mo ₂	ε	53	Mo ₂ N	-
					MoN	
V	V ₄ C ₃	FeV	ε	48	VN	V ₂ O ₃
	VC					
Ti	TiC	Fe ₂ Ti	ε	30	TiN	TiO ₂
W	W ₂ C	Fe ₂ W	ε	62	W ₂ N	WO ₂
	WC				W ₂ N ₂	
Co	-	-	-	-	-	-
Al	-	Fe ₃ Al	α ₁	13,9	AlN	Al ₂ O ₃
Cu	-	-	-	-	-	-

Wtrącenia niemetaliczne, występujące w stalach, dzieli się na dwie grupy:

- egzogeniczne – cząstki materiałów ogniotrwałych lub żużla (np. krzemiany SiO₂, aluminaty 3CaO·Al₂O₃, spinele MgO·Al₂O₃ lub FeO·Al₂O₃),
- endogeniczne – produkty reakcji składników stali – wtrącenia powstałe w wyniku odtleniania (SiO₂, Al₂O₃, MnO) lub odsiarczania stali np. (Mn,Fe)S.

Wpływ wtrąceń na właściwości stali zależy od kształtu, wymiarów i równomierności ich rozkładu.

Do pierwiastków, które nie rozpuszczają się w żelazie w stanie stałym i nie tworzą żadnych faz międzymetalicznych (występują w stanie wolnym) należą: Li, Na, Mg, K, Ca, Ag, Cd, Pb, Bi. Tylko ołów (ok. 0,2 %) odgrywa pewną rolę, powodując łamliwość wióra w stalach łatwo obrabialnych (automatowych).

WŁAŚCIWOŚCI		PIERWIASTEK STOPOWY									
		Si	Cr	Al	W	V	Co	Mo	Cu	S	P
Włas- ciwo- ści me- cha- nicz- ne	twardość	↑	↑↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
	wytrzy- małość	↑	↑↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
	granica plastyczności	↑↑	↑↑	-	↑	↑	↑	↑	↑↑	-	↑
	wydłużenie	↓	↓	-	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
	przewężenie	~	↓	↓	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
	udarność	↓	↓	↓	~	↑	↓	↑	~	↓	↓↓↓
	sprężystość	↑↑↑	↑	-	-	↑	-	-	-	-	-
	żaro- wytrzymałość	↑	↑	-	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑	-	-
krytyczna szybkość chłodzenia		↓	↓↓↓	-	↓↓	↓↓	↑↑	↓↓	-	-	-
węglikotwórczość		↓	↑↑	-	↑↑	↑↑↑↑	-	↑↑↑	-	-	-
odporność na zużycie		↓↓↓	↑	-	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	↑↑	-	-	-
podatność na obróbkę plastyczną		↓	↓	↓↓	↓↓	↑	↓	↓	↓↓↓	↓↓↓	↓
skrawalność		↓	-	-	↓↓	-	~	↓	~	↑↑↑	↑↑
podatność na tworzenie zgorzeli		↓	↓↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓	↑↑	~	-	-
podatność na azotowanie		↓	↑↑	↑↑↑	↑	↑	-	↑↑	-	-	-
odporność na korozję		-	↑↑↑	-	-	↑	-	-	↑	↓	-
włas- ności mag- nety- czne	histereza	↓↓									
	przenikalność magnetyczna	↑↑					↑↑				
	siła korekcji	↓↓	↑	↑↑	↑↑↑		↑↑↑	↑			
	pozostałość magnetyczna	-	↑↑	↑↑	↑↑↑		↑↑↑				
	stratność watowa	↓↓									
↑ zwiększenie; ↓ zmniejszenie; ~ wpływ niemal stały; - wpływ nieznamy lub nie jest charakterystyczny; kilka strzałek- działanie bardziej intensywne											

Rys. 10.7. Wpływ dodatków stopowych na właściwości stali [Dobr-02]

Dodatki stopowe są wprowadzane do stali aby spowodować określone zmiany struktury oraz w celu podwyższenia właściwości wytrzymałościowych, zmiany niektórych właściwości chemicznych lub fizycznych, podwyższenia hartowności, polepszenia efektywności oraz ułatwienia obróbki cieplnej. Wpływ głównych dodatków stopowych na właściwości mechaniczne, fizyczne i technologiczne stopów żelaza przedstawiono schematycznie na rysunku 10.7.

10.1.2. Stale stopowe – klasyfikacja

Stale stopowe (podobnie jak niestopowe – rozdział 8) można klasyfikować wg różnych kryteriów np.: zawartości pierwiastków stopowych, zastosowanie, struktura. Ze względu na całkowite stężenie pierwiastków stopowych, stale stopowe podzielić można na następujące grupy:

- niskostopowe – stężenie jednego z pierwiastków (poza węglem) $< 2\%$, a suma wszystkich pierwiastków razem $< 3,5\%$;
- średniostopowe – stężenie jednego z pierwiastków (poza węglem) $> 2\%$ lecz $< 8\%$, lub suma wszystkich pierwiastków razem $< 12\%$;
- wysokostopowe – stężenie jednego z pierwiastków $> 8\%$, a suma pierwiastków razem $< 55\%$.

Stopy na bazie żelaza, które zawierają ponad 50% dodatków stopowych określone są jako nadstopy.

10.1.3. Systemy znakowania stali

Według Norm Europejskich stosowane są dwa systemy do oznaczania stali:

- System znakowy (według PN-EN 10027-1:2016-12) – składający się z symboli literowych i cyfr. Symbole stosowane w znaku wskazują na główne cechy stali (np. właściwości mechaniczne lub fizyczne, skład chemiczny albo zastosowanie), ułatwia to przybliżoną identyfikację danego gatunku stali. Zgodnie z tym systemem znakowym, według składu chemicznego, znak stali tworzony jest następująco:

A. Stale niestopowe (bez automatowych), które zawierają mangan średnio poniżej 1%. Znak tworzy się z litery C oraz liczby, która oznacza średnią zawartość węgla w setnych częściach %.

Przykład: C50 – stal konstrukcyjna niestopowa do ulepszania cieplnego (wg PN oznaczana 50), zawiera średnio 0,50 % C.

B. Stale o średniej zawartości Mn $\geq 1\%$ oraz stale stopowe (bez stali szybkołącznych), w których zawartość każdego z pierwiastków stopowych jest poniżej 5%. Znak ogólny:

$$\text{CCC SSS nn-nn-nn} \quad (10.1)$$

gdzie:

CCC – to liczba, która informuje o średniej zawartości węgla w setnych częściach % wag.;

SSS – symbole chemiczne pierwiastków – dodatków stopowych stali, które są uporządkowane wg malejącej ich koncentracji (gdy zawartość dwóch pierwiastków jest taka sama – podawane są w kolejności alfabetycznej);

nn-nn-nn – liczby, które odpowiadają średniej zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych (w % wag.) pomnożone przez odpowiedni współczynnik z tabeli 10.4, zaokrąglone do najbliższej liczby całkowitej, oddzielone od siebie poziomą kreską.

Przykład: 41Cr4 – stal stopowa konstrukcyjna do ulepszania cieplnego (oznaczenie wg PN 40H), zawiera średnio 0,41 % C, 1,05 % Cr.

Tabela 10.4. Współczynniki do oznaczania zawartości pierwiastków stopowych [PN-EN 10027-1:2016-12]

Symbol chemiczny pierwiastka	Współczynnik
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S,	100
B	1000

C. Stale stopowe (bez szybkołącznych), które zawierają co najmniej 1 pierwiastek stopowy występuje w ilości $\geq 5\%$. Znak ogólny:

$$\mathbf{X\ CCC\ SSSS\ N-N-N-N} \quad (10.2)$$

gdzie:

X – symbol danej grupy stali;

CCC – to liczba, która informuje o średniej zawartości węgla w setnych częściach % wag.;

S – symbole chemiczne pierwiastków – dodatków stopowych stali, które są uporządkowane wg malejącej ich koncentracji (gdy zawartość dwóch pierwiastków jest taka sama – podawane są w kolejności alfabetycznej);

N – liczby, które odpowiadają średniej zawartości (% wag.) pierwiastków dodatków stopowych (z zaokrągleniem do najbliższej liczby całkowitej).

Przykład: X39Cr13 – stal stopowa odporna na korozję (wg PN 4H13), zawiera średnio 0,39 % C, 13,5 % Cr.

D. Stale szybkołączące – znak ogólny:

$$\mathbf{HS\ X-Y-V-Z} \quad (10.3)$$

Oznaczenie rozpoczyna się od liter HS, a następnie liczb (rozdzielonych kreskami) informujących o średnim stężeniu (w % wag.) pierwiastków stopowych w kolejności: **W-Mo-V-Co**. Zawartości chromu w stalach szybkołącznych nie podaje się, ponieważ wszystkie gatunki zawierają ok. 4 %.

Przykłady: HS6-5-2 (SW7M wg PN); HS18-0-1 (SW18 wg PN).

- System cyfrowy (PN-EN 10027-2:2015-07) – oznaczenie stali składa się tylko z 5 cyfr:

$$\mathbf{X.YYZZ} \quad (10.4)$$

gdzie:

X – rodzaj stopu (np. 1 – stop żelaza),

YY – grupa (np. 01÷07 – stale niestopowe jakościowe),

ZZ – konkretny gatunek w grupie.

Przykłady: 1.0402 – stal konstrukcyjna niestopowa C22; 1.7035 – konstrukcyjna stopowa do ulepszania ciepłego 41Cr4; 1.3505 – stal stopowa łożyskowa 100Cr6; 1.3343 – stal narzędziowa szybkotnąca HS6-5-2.

W normie PN-EN 10027-2:2015-07 zawarto postanowienia, które dotyczą budowy numerów stali oraz organizacji związanej z ich rejestrowaniem, ustalaniem i rozpowszechnianiem. System cyfrowy stali uzupełnia system oznaczania stali ustalony w PN-EN 10027-1:2016-12. System cyfrowy oznaczania stali, wprowadzony w państwach UE od 1992 r., jest bardziej użyteczny do przetwarzania w bazach danych niż system znakowy.

Stosowanie wymagań tej normy jest obligatoryjne w stosunku do gatunków stali, które są ujęte w normach europejskich i fakultatywne w stosunku do gatunków krajowych stali oraz tworzonych własnych gatunków stali. Każdy gatunek stali ma nadany znak i numer, który jednoznacznie identyfikuje tylko jeden materiał.

10.1.4. Klasyfikacja stali stopowych wg przeznaczenia

Zależnie od przeznaczenia stale muszą wykazywać określony zespół właściwości i podzielone są na trzy grupy:

- konstrukcyjne i maszynowe,
- narzędziowe,
- stale i stopy o szczególnych właściwościach.

10.1.5. Stale stopowe konstrukcyjne i maszynowe

Stale stopowe konstrukcyjne i maszynowe używane są do wytwarzania części maszyn oraz konstrukcji, które pracują w zakresie temperatury (25-300) °C, w środowisku o niewielkim działaniu korozyjnym. Podstawowe właściwości mechaniczne stanowią kryterium doboru tych stali. Do grupy tej zalicza się stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości, mikroskopowe do pracy w obniżonej i podwyższonej temperaturze, przeznaczone do nawęglania, azotowania, ulepszania ciepłego, sprężynowe, łożyskowe oraz stale do budownictwa. Poza łożyskowymi, są to stale o małej lub średniej zawartości węgla oraz niskostopowe. W tabeli 10.5a podano skład chemiczny, a w tabeli

10.5b odpowiednio oznaczenia oraz właściwości wybranych stali stopowych konstrukcyjnych.

Tabela 10.5a. Stale stopowe konstrukcyjne – skład chemiczny

Rodzaj stali	Średni skład stali, %				
	C	Mn	Si	Cr	Inne
Niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości NSPW	<0,18 <0,20	<1,5 <1,5	<0,55 <0,55	- -	0,1Mo; 0,06Nb; 0,1V 0,06Nb
Do nawęglania	0,20	1,05	0,25	1,05	-
	0,20	1,05	0,25	1,05	0,25Mo
Do azotowania	0,38	0,45	0,25	1,50	0,2Mo; 0,9Al
Do ulepszania cieplnego	0,40	0,65	<0,40	1,05	-
	0,36	0,65	≤0,40	1,05	1,5Ni; 0,23Mo
Sprężynowe	0,39	0,65	1,65	-	-
	0,51	0,90	≤0,4	1,05	0,18V
Łożyskowe	1,00	0,35	0,25	1,50	Mo<0,1
	1,00	1,1	0,60	1,50	Mo<0,1

Tabela 10.5b. Stale stopowe konstrukcyjne – oznaczenia i właściwości

Rodzaj stali	Znak stali według		R _e MPa	R _m MPa
	PN	PN-EN		
Niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości NSPW	15G2ANb	15MoVNb1-1	390	660
	18G2	18Nb	420	690
Do nawęglania	20HG	20MnCr5	-	900
	18HGM	18CrMo4	-	1100
Do azotowania	38HMJ	41CrAlMo7-10	750	950
Do ulepszania cieplnego	40H	41Cr4	800	1000
	36HNM	36CrNiMo4	900	1100
Sprężynowe	40S2	38Si7	1150	1300-1600
	50HF	51CrV4	1200	1350-1650
Łożyskowe	ŁH15	100Cr6	-	-
	ŁH15SG	100CrMnSi6-4	-	-

Elementy wielu konstrukcji (mosty, statki, do zbrojenia betonu, urządzenia ciśnieniowe, rury do rurociągów) wykonywane są ze stali niskostopowych spawalnych o podwyższonej wytrzymałości (NSPW) – ujęte w różnych normach. Stale te powinny wykazywać dobrą spawalność, wysoką wytrzymałość R_m, granicę plastyczności R_e oraz dobrą udamność z niską temperaturą przejścia w stan kruchy. Osiągnięcie wymaganych właściwości tych stali uży-

skiwane jest przez odpowiedni skład chemiczny, a także technologię wytopu, obróbkę plastyczną oraz obróbkę cieplną.

Stale do nawęglania (PN-EN 10084:2008) stosuje się do wytwarzania części maszyn, które wykazują wysoką twardość powierzchni oraz ciągliwość rdzeń. Są to stale o zawartości węgla poniżej 0,25%, które zawierają dodatki stopowe Mn, Cr, Ni, Mo. Po nawęglaniu części maszyn są hartowane i poddawane niskiemu odpuszczaniu.

Stale do azotowania (PN-EN 10085:2003) stosowane są do wytwarzania części maszyn, od których wymagana jest wysoka twardość powierzchni i zwiększona odporność korozyjna powierzchni, a także wysoka wytrzymałość rdzenia. Aby podczas azotowania rdzeń azotowanej stali nie uległ mięknięciu, azotowanie prowadzone jest zwykle w temperaturze do 550 °C, a wcześniej stale poddawane są ulepszaniu cieplnemu z nieznacznie wyższą temperaturą odpuszczania. Aluminium występujące w składzie stali do azotowania przyspiesza i ułatwia proces azotowania.

Stale konstrukcyjne do ulepszania cieplnego (PN-EN 10083-1:2008) używane są do budowy części maszyn, pojazdów i różnych konstrukcji. Stosowana obróbka cieplna dla stali składa się z hartowania i odpuszczania wysokiego w zakresie temperatury (550-650) °C. Struktura z sorbitem, otrzymywana po ulepszaniu cieplnym, zapewnia wysoką wartość ilorazu granicy plastyczności do wytrzymałości na rozciąganie (R_e/R_m), przy zachowaniu wysokiej uduktowności stali. Na części maszyn, od których wymagana jest wysoka twardość powierzchni oraz dobra ciągliwość rdzenia stosowane są stale do utwardzania powierzchniowego – ujęte w tej samej grupie.

Stale sprężynowe (PN-EN 10089:2005) stosowane są do wytwarzania sprężyn, resorów i drążków skrętnych. Charakteryzują się wysoką granicą sprężystości i wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Są to stale wysokowęglowe (> 0,45% C) z dodatkami pierwiastków silnie utwardzających ferryt (np. Si, a w gatunkach o wymaganej większej hartowności – również Cr i V).

Stale stosowane na łożyska toczne (PN-EN ISO 683-17:2004) używane do wytwarzania elementów tocznych oraz pierścieni łożysk. Są to stale o zawartości 0,9-1,1% C oraz dodatki 1,5% Cr oraz Mn i Si. Elementy łożysk poddawane są hartowaniu w oleju i nisko odpuszczane przy 150-160°C.

Ze stali do pracy przy obniżonej temperaturze (PN-EN 10028-4:2005) wytwarzane są zbiorniki na ciekłe gazy, konstrukcje oraz rurociągi pracujące przy obniżonej temperaturze. Muszą wykazywać bardzo niską temperaturę przejścia w stan kruchy. Dobrymi właściwościami przy niskiej temperaturze charakteryzują się stale niskowęglowe z zawartością ok. 1% Mn. Dodatek niklu w stalach niskowęglowych daje dobrą ciągliwość w niskiej temperaturze. Stosu-

je się też stale austenityczne, niewykazujące przejścia w stan kruchy (np.: 13MnNi6-3; 12Ni4; X8Ni9).

Na urządzenia energetyczne (rury kotłowe), aparaturę chemiczną stosuje się stale przeznaczone do pracy przy podwyższonej temperaturze (PN-EN 10222-2:2002 – przykładowe gatunki 16Mo3; HCrMo9-10). Dodatek Cr i Mo do stali niskowęglowych utrudnia zjawisko pełzania materiału.

10.1.6. Stale stopowe narzędziowe

Stale stopowe narzędziowe zawierają na ogół wyższą zawartość węgla oraz dodatków stopowych. Można wyróżnić stale narzędziowe do pracy na zimno, do pracy na gorąco oraz szybko tnące. Ostateczne właściwości nadaje się im przez obróbkę cieplną (zwykle hartowanie i odpuszczanie). Jest to największa i najpowszechniej stosowana grupa materiałów narzędziowych.

Wymagania, które są stawiane stalom stosowanym do wykonywania narzędzi, dotyczą głównie zachowania ich stałości kształtu. Stale takie powinny wykazywać znaczną odporność na przenoszenie obciążeń bez odkształceń plastycznych, odporność na zużycie, głównie na zużycie ścieranie. Dla zapewnienia dobrej odporności na ścieranie stale na narzędzia powinny wykazywać wysoką twardość, zwykle powyżej 60HRC. Wysoka twardość wpływa zazwyczaj niekorzystnie na obniżenie ciągliwości, która zabezpiecza narzędzia przed pękaniem przy obciążeniach dynamicznych. Dlatego maksymalna twardość używana po obróbce cieplnej rzadko jest jedynym kryterium doboru warunków obróbki cieplnej dla stali stopowych stosowanych na narzędzia. Stale narzędziowe stopowe używane są na narzędzia przeznaczone do kształtowania materiałów poprzez obróbkę skrawaniem, narzędzia do przeróbki plastycznej oraz na przyrządy pomiarowe.

Klasyfikacja stali stopowych narzędziowych zawarta jest w normie PN-EN ISO 4957:2018-09. W tabelach 10.6a i 10.bb zamieszczono skład chemiczny, oznaczenia oraz twardość uzyskiwana po obróbce cieplnej dla wybranych gatunków stali narzędziowych.

Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno służą do obróbki nienagranych ($< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) materiałów. Stosowane są do: obróbki skrawaniem (wysokowęglowe $0,75\div 2,1\text{ }\%$ C) i do przeróbki plastycznej (średniowęglowe $0,4\div 0,55\text{ }\%$ C). Podstawowe dodatki stopowe Cr, W, V, Mo, Si, nadają stali większą hartowność, odporność na odpuszczanie, dobre właściwości wytrzymałościowe, dużą odporność na ścieranie (tworzenie się twardych węglików o dużej dyspersji). Krzem zwiększa ciągliwość zahartowanej stali i odporność na podwyższoną temperaturę. Większa w porównaniu ze stalami węglowymi hartowność, pozwala na hartowanie w oleju lub roztopionych solach, co zmniejsza skłonność do pęknięć i odkształceń. W niektórych stalach dodatki węgliko-

twórcze wywołują efekt twardości wtórnej, związany z wydzielaniem drobno-dyspersyjnych węglików stopowych typu M_4C_3 , M_2C , $M_{23}C_6$ lub M_6C po odpuszczaniu. Temperatura odpuszczania dobierana jest w zależności od wymaganej ostatecznie twardości narzędzi.

Stale narzędziowe stosowane do pracy na gorąco używane są do wytwarzania narzędzi używanych przy przeróbce plastycznej materiałów uprzednio nagranych do wysokiej temperatury (250-700) °C. Z tego względu nie wymagają zbyt wysokiej twardości i odporności na ścieranie. Muszą wykazywać wysoką wytrzymałość i twardość w podwyższonej temperaturze, dobrą ciągliwość, stabilność struktury, odporność na zmęczenie cieplne. Niska zawartość węgla (0,25-0,60)% zapewnia im dobrą ciągliwość, a pierwiastki stopowe (W, Mo, V) powodują efekt twardości wtórnej podczas odpuszczania, lub hamują obniżanie twardości podczas odpuszczania. Chrom zapewnia dobrą hartowność. Typowa obróbka cieplna, to hartowanie i odpuszczanie w temperaturze wyższej o około 100 °C od temperatury nagrzewania narzędzi w czasie ich pracy.

Tabela 10.6a. Stale narzędziowe – skład chemiczny

Rodzaj stali narzędziowej	Średni skład stali, % wag.				
	C	Mn	Si	Cr	inne
Niestopowa	0,70	0,22	0,22	-	-
	1,05	0,25	0,25	-	-
Do pracy na zimno	0,50	0,30	0,85	1,15	1,85W; 0,15V
	2,00	0,40	0,35	12,0	-
Do pracy na gorąco	0,32	0,30	0,30	3,0	2,8Mo; 0,55V
	0,55	0,75	0,30	1,0	1,6Ni; 0,45Mo; 0,1V
Szybkotnąca	0,85	0,30	0,30	4,0	6,3W; 5,0Mo; 1,9V
	0,90	0,30	0,30	4,0	6,3W; 5,0Mo; 2,0V; 5,0Co

Tabela 10.6b. Stale narzędziowe – oznaczenia i właściwości

Rodzaj stali narzędziowej	Znak stali według		Twardość HV
	PN	PN-EN ISO	
Niestopowa	N7E	C70U	720
	N10	C105U	746
Do pracy na zimno	NZ3	50WCrV8	635
	NC11	X210Cr12	700
Do pracy na gorąco	WLV	32MoV12-28	460
	WNL1	55NiCrMoV7	420
Szybkotnąca	SW7M	HS6-5-2	800
	SK5M	HS6-5-2-5	830

Stale szybko tnące, to podstawowy materiał na narzędzia skrawające stosowane do skrawania z dużymi prędkościami. Ulegają nagrzaniu podczas pracy (do 550-600 °C), z tego względu wymaga się dużej twardości na zimno i w podwyższonej temperaturze. Właściwości te uzyskuje się dzięki odpowiedniemu składowi chemicznemu oraz odpowiedniej obróbce cieplnej (najczęściej hartowanie i dwu- lub trzykrotne odpuszczanie). Mają one twardą, niemięknącą pod wpływem odpuszczania ośnowę, w której rozmieszczone są twarde węgliki stopowe (pierwotne i wtórne). Stale szybko tnące zawierają węgiel (0,60–1,60 %), chrom (3,5–5 %) – zwiększa hartowność, wolfram (do 20%) – nadaje żarowytrzymałość i twardość, molibden (do 9 %) – może zastępować W, wanad (1–5 %) nadaje dużą twardość i żarowytrzymałość, kobalt (do 15 %) – podnosi wytrzymałość, żarowytrzymałość i skrawność.

10.1.7. Stale i stopy o szczególnych właściwościach

Stale i stopy o szczególnych właściwościach mają najbardziej zróżnicowane składy i zastosowania, a tym samym właściwości. Według normy PN-EN 10020:2003 należą do klasy stali odpornych na korozję i grupy stali stopowych jakościowych innych (np. elektrotechnicznych) oraz stali stopowych specjalnych o szczególnych właściwościach fizycznych. W tabelach 10.7a i 10.7b podano skład chemiczny oraz oznaczenia i właściwości wybranych stali stopowych o szczególnych właściwościach.

W stalach nierdzewiejących i kwasoodpornych (PN-EN 10088-1:2014-12, PN-EN 10088-2:2014-12) wprowadzając do żelaza chrom powyżej 10,5 %, wzrasta potencjał elektrochemiczny takiego stopu, a przez to skokowo wzrasta jego odporność na korozję. Od stali nierdzewiejących wymaga się odporności na działanie atmosfery powietrza, wilgoci oraz słabych roztworów soli lub kwasów. Stale kwasoodporne wykazują znaczną odporność na działanie stężonych kwasów lub ługów. Grupy stali odpornych na korozję:

- ferrytyczne – przy dostatecznie wysokiej koncentracji Cr i bardzo niskiej zawartości węgla, ferryt jest stabilną fazą aż do temperatury topnienia. Stale te są odporne na działanie kwasów utleniających (np. azotowego), nie wykazują odporności na kwasy redukujące (siarkowy, solny), są też spawalne.
- martenzytyczne – gdy w stali występuje ponad 13% Cr oraz węgiel powyżej 0,1%, to w temperaturze powyżej 950 °C występuje austenit, więc można je hartować na martenzyt. Stale o strukturze martenzytycznej nie są kwasoodporne lecz zaliczane są do nierdzewiejących.
- austenityczne – struktura austenityczna może występować w stalach zawierających chrom oraz co najmniej 8% niklu. Nikiel może być częściowo zastąpiony podwójną ilością manganu. Stale austenityczne wy-

kazują odporność na działanie większości kwasów, wyjątek stanowi kwas solny. Niekorzystnym zjawiskiem w tej grupie stali jest korozja międzykrystaliczna, którą powodują wydzielana węglików typu $M_{23}C_6$ na granicach ziaren austenitu. Węglik te są bogate w chrom, co jest przyczyną obniżenia stężenia chromu w strefach przy granicach ziaren austenitu. Jeżeli w tych strefach zawartość chromu spadnie poniżej 10,5%, to w stalach dochodzi do korozji wzdłuż granic ziaren austenitu. Można zapobiec temu niekorzystnemu zjawisku ograniczając stężenie węgla w stalach do 0,02-0,03%, aby zapobiec powstawaniu węglików chromu, lub poprzez dodatki pierwiastków silniej węglikotwórcze niż chrom np. Nb, Ti, Hf i związanie ich z węglem.

- duplex – o dwufazowej strukturze ferrytyczno-austenitycznej. Najkorzystniejsze właściwości wykazują stale ze strukturą 50% ferrytu i 50% austenitu. Zawierają węgiel do 0,03% oraz chrom 22-25% i nikiel 4-7%, także dodatki Mo, W, Si, Cu, Ti. Szczególnie ważnym jest dodatek azotu, który sprzyja powstawaniu austenitu, zwiększa wytrzymałość oraz spawalność. Stale duplex posiadają wyższą granicę plastyczności niż stale ferrytyczne i austenityczne, posiadają wysoką odporność na pękanie naprężeniowo-korozyjną, dlatego stosowane są w agresywnych środowiskach chlorków i siarkowodoru.

Tabela 10.7a. Stale stopowe o szczególnych właściwościach – skład chemiczny

Rodzaj stali	Średni skład stali, % wag.				
	C	Mn	Si	Cr	Inne
Oporna na korozję; ferrytyczna	≤0,08 ≤0,08	≤1,0 ≤1,0	≤1,0 ≤1,0	13,0 17,0	- -
Odporna na korozję; martenzytyczna	0,12 0,17	≤1,5 ≤1,5	≤1,0 ≤1,0	12,5 16,0	Ni≤0,75 2,0Ni
Odporna na korozję; austenityczna	≤0,08 ≤0,02	≤2,0 ≤2,0	≤1,0 ≤1,0	18,0 20,0	10,5Ni, Ti≤0,7 25Ni; 4,5Mo; 1,6Cu; N≤0,11
Odporna na korozję; duplex	≤0,03	≤2,0	≤1,0	23,0	4,5Ni ; 0,4Mo; 0,13N; 0,35Cu
Żaroodporna i żarowytrzymała; ferrytyczna	≤0,12	≤0,8	1,1	18,0	1,0Al
Żaroodporna i żarowytrzymała; austenityczna	≤0,10	≤1,5	≤1,0	18,0	10,0Ni, Ti≤0,9
Zaworowa	0,40	≤0,8	2,5	10,5	1,1Mo
Magnetycznie twarda	0,98	0,30	0,30	6,0	6,0 Co

Tabela 10.7b. Stale stopowe o szczególnych właściwościach – oznaczenia

Rodzaj stali	Znak stali według		Właściwości
	PN	PN-EN	R _m , MPa
Oporna na korozję; ferrytyczna	0H13	X6Cr13	400-600
	0H17	X6Cr17	430-630
Odporna na korozję; martenzytyczna	1H13	X12Cr13	550-850
	H17N2	X17CrNi16-2	800-1050
Odporna na korozję; austenityczna	1H18N9T	X6CrNi18-10	500-700
	0H22N24M4TCu	X1NiCrMoCu25-20-5	530-730
Odporna na korozję; duplex	-	X2CrNiN23-4	600-850
Żaroodporna i żarowy- trzymała; ferrytyczna	H18JS	X10CrAlSi18	<1000°C
Żaroodporna i żarowy- trzymała; austenityczna	0H18N10T	X8CrNiTi18-10	<850°C
Zaworowa	H10S2M	X40CrSiMo10-2	R _{p0,2} = 260MPa
Magnetycznie twarda	H6K6	X98CoCr6-6	H _c = 7560A/m

Stale oraz stopy żaroodporne i żarowytrzymałe. Żaroodporność, to odporność na utleniające działanie gazów w temperaturze powyżej 600°C. Żarowytrzymałość, to odporność na odkształcenie plastyczne w temperaturze powyżej 600°C (odporność na pełzanie). Stale te umacnia się wydzieleniami związków międzymetalicznych. Ta grupa stopów klasyfikowana jest w normach PN-EN 10095:2002 i PN-EN 10302:2009, a stopy na zawory silników samochodowych w PN-EN 10090:2001. Specjalne stopy żarowytrzymałe i żaroodporne stosowane są na łopatki nowoczesnych turbin i silników odrzutowych nagrzewają się do temperatury 700÷900°C. Stosuje się cztery grupy stopów: na osnowie żelaza z chromem i niklem, złożone stopy chrom-nikiel-kobalt-żelazo, stopy na osnowie kobaltu oraz stopy na osnowie niklu.

W grupie stali stopowych o szczególnych właściwościach fizycznych mieszczą się materiały magnetycznie miękkie, które posiadają wąską i wysmukłą pętlę histerezy magnetycznej, co odpowiada dużej pozostałości magnetycznej i niskiej koercji. Natomiast materiały magnetyczne twarde posiadają szeroką pętlę histerezy o małej pozostałości magnetycznej, ale znacznie wyższej koercji. Materiały niemagnetyczne stosowane do budowy osłon wirników w generatorach oraz do wytwarzania śrub stosowanych w transformatorach.

Materiałem o dużej odporności na ścieranie jest stal (Hadfielda) manganowa (11-14 % Mn) austenityczna, zawierająca 1-1,3 %C np. X120Mn12 (BN-68/0631-03). Stosunek ilości C:Mn powinien wynosić 1:10, gdyż tylko dostateczna zawartość węgla warunkuje stałość struktury austenitycznej. Stal

taka ma niską granicę sprężystości i plastyczności (400 MPa), niską twardość (210 HB) przy wysokiej wytrzymałości ($R_m = 1050$ MPa) i bardzo dobrych właściwościach plastycznych ($A = 50\%$, $Z = 60\%$). Stal Hadfielda cechuje duża odporność na ścieranie przy dobrej udurowalności (300 J/cm^2), w przeciwieństwie do zahartowanych stali, które odznaczają się również wysoką odpornością na ścieranie, ale są kruche. Stal ta jest odporna na ścieranie tylko wtedy, gdy zachodzi ono przy jednoczesnym znacznym docisku powierzchniowym.

10.1.8. Stale i inne biomateriały metalowe

Od wielu lat w medycynie zastosowanie znajdują metale i ich stopy. Jednym z kryteriów stosowania implantu metalicznego jest jego odporność na korozję w organizmie podczas kontaktu z płynami ustrojowymi oraz jego biogodność [Marc-13]. Wymagania stawiane biomateriałom metalowym:

- wysoka odporność na korozję zmęczeniową,
- dobra udurowalność,
- wysoka wytrzymałość na rozciąganie i zginanie,
- odpowiednie własności elektryczne,
- odpowiednio niskie koszty wytwarzania.

Oprócz struktury i właściwości fizykochemicznych biomateriału metalowego ważne są badania biologiczne, które określają reakcje toksykologiczne, alergiczne i inne niekorzystne efekty. Obecnie stosowane grupy biomateriałów metalowych, to:

- stale Cr-Ni-Mo ze strukturą austenityczną,
- tytan oraz stopy tytanu,
- stopy kobaltu z dodatkiem Cr i Mo,
- tantal, niob oraz ich stopy,
- stopy z pamięcią kształtu (np. Ni-Ti),
- metale szlachetne oraz stopy na ich osnowie.

10.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze strukturą stali stopowych oraz wybranych biomateriałów metalowych w powiązaniu z ich właściwościami i zastosowaniem.

10.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Określenie stali stopowej. Postacie występowania dodatków stopowych w stali. Wpływ dodatków stopowych na strukturę stali. Typy układu Fe-Me (Me – pierwiastki stopowe).

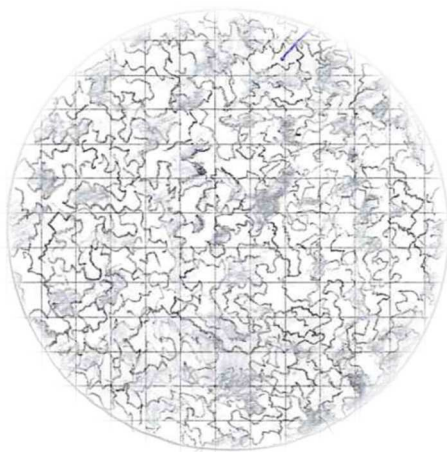
2. Wpływ dodatków stopowych na właściwości stali (twardość, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, przewężenie, udarność).
3. Podział, znakowanie oraz charakterystyka stali stopowych konstrukcyjnych wg PN-EN.
4. Wymagania stawiane stalom stosowanym na narzędzia. Stale narzędziowe stopowe, podział i znakowanie wg PN-EN i PN-EN ISO
5. Podział, znakowanie oraz charakterystyka stali stopowych o specjalnych właściwościach.
6. Struktura oraz właściwości biomateriałów metalowych stosowanych w implantologii. Biokompatybilność biomateriałów metalowych.
7. Przykłady stopów stosowanych jako biomateriały (stale, stopy na osnowie kobaltu, stopy z pamięcią kształtu, tytan i jego stopy, magnez oraz stopy magnezu, stopy dentystyczne na osnowie metali szlachetnych).

10.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać.

1. Wykres wpływu dodatków stopowych na twardość i udarność ferrytu.
2. Działanie dodatków stopowych na punkty S i E w układzie Fe-Fe₃C.
3. Klasyfikacja stali ze względu na strukturę na podstawie krzywych CTP_i.
4. Podział oraz znakowanie wg PN-EN stali stopowych konstrukcyjnych i o specjalnych właściwościach.
5. Podział oraz właściwości biomateriałów metalowych
6. Rysunki i opis mikrostruktur stali i stopów wykonanych na ćwiczeniu.

10.2.3. Obrazy mikrostruktury

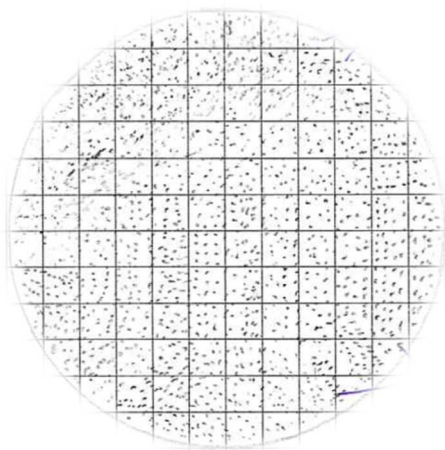
Na rysunkach 10.8-10.13 przedstawiono przykładowe obraz mikrostruktury stali stopowych oraz biomateriałów metalowych (rys. 10.14-10.17). Są to szkice struktury pochodzące ze sprawozdań studenckich.



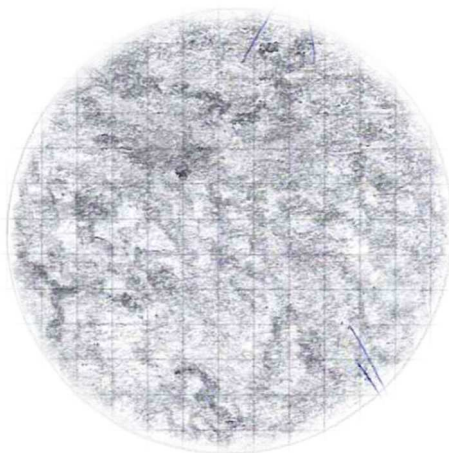
Rys. 10.8. Stal 41Cr4 stopowa konstrukcyjna do ulepszenia cieplnego – po wyżarzaniu normalizującym. Struktura: perlit stopowy i ferryt stopowy. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



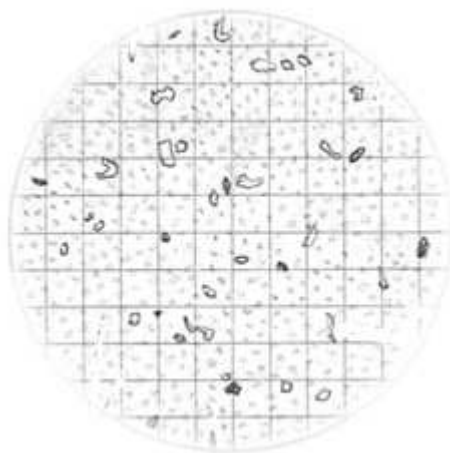
Rys. 10.9. Stal 50HS (znak wg PN-H-84032:1974) stopowa konstrukcyjna sprężynowa, resorowa – po wyżarzaniu normalizującym. Struktura: perlit stopowy i ferryt stopowy. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



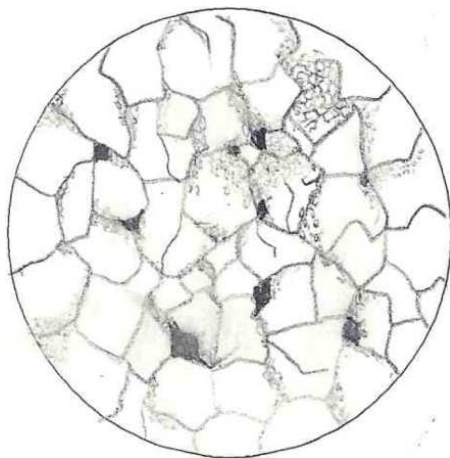
Rys. 10.10. Stal 100Cr6 stopowa konstrukcyjna łożyskowa – po wyżarzaniu zmiękczającym. Struktura: kuliste węgliki stopowe o dużej dyspersji w osnowie ferrytu stopowego. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



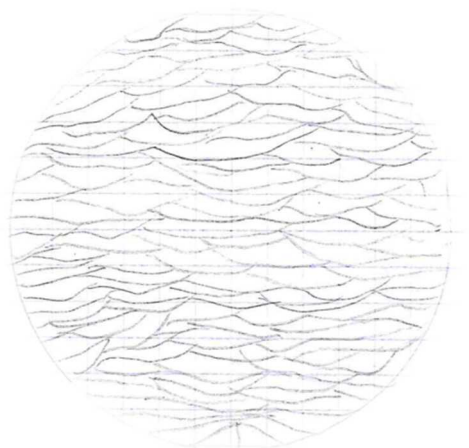
Rys. 10.11. Stal 102Cr6 stopowa narzędziowa do pracy na zimno – po hartowaniu i odpuszczaniu niskim. Struktura: kuliste węgliki stopowe w osnowie martenzytu niskoodpuszczonego. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 10.12. Stal HS6-5-2 stopowa narzędziowa szybkołnąca – po hartowaniu i dwukrotnym odpuszczaniu. Struktura: węgliki stopowe (pierwotne większych rozmiarów oraz wtórne o dużej dyspersji) w osnowie martenzytu odpuszczonego. Zgląd trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



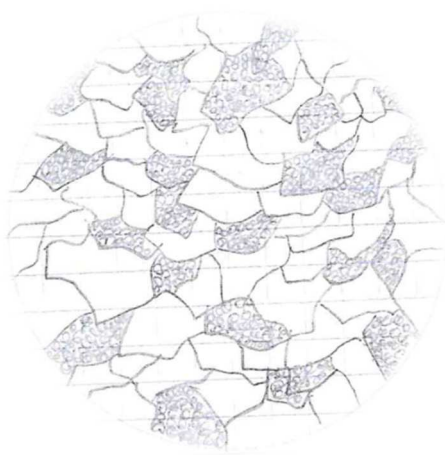
Rys. 10.13. Stal X15CrNiSi25-21 stopowa o szczególnych właściwościach, żaroodporna. Struktura: austenit stopowy, kuliste węgliki stopowe na granicach ziaren austenitu stopowego. Zgląd trawiony: roztwór 3 ml HF + 1 ml HNO_3 w 3 ml gliceryny $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$. Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



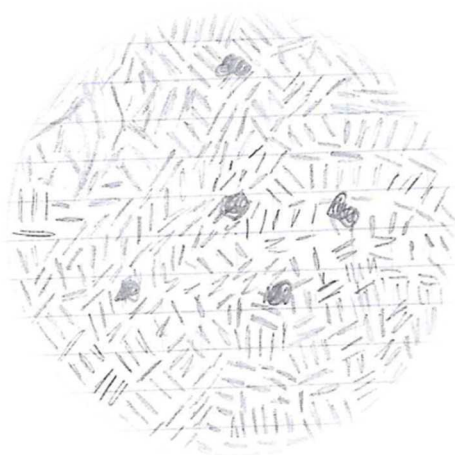
Rys. 10.14. Stal AISI 316L (Cr-Ni-Mo) stopowa o szczególnych właściwościach, odporna na korozję – na implanty medyczne. Struktura: wydłużone po walcowaniu ziarna austenitu stopowego. Zgład trawiony: roztwór 3 ml HF + 1 ml HNO₃ w 3 ml gliceryny C₃H₅(OH)₃. Powiększenie mikroskopowe ×500



Rys. 10.15. Stop na osnowie kobaltu Co-Cr-Mo – na implanty medyczne. Struktura: osnowa ziarna fazy β-Co oraz wydzielienia węglików. Zgład trawiony: roztwór 3ml HCl + 1ml HNO₃. Powiększenie mikroskopowe ×500



Rys. 10.16. Stop tytanu TiAl6V4 – na implanty medyczne. Struktura: ziarna fazy α i β . Zgład trawiony: roztwór 2% HF + 2% HNO₃ + 96% H₂O. Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



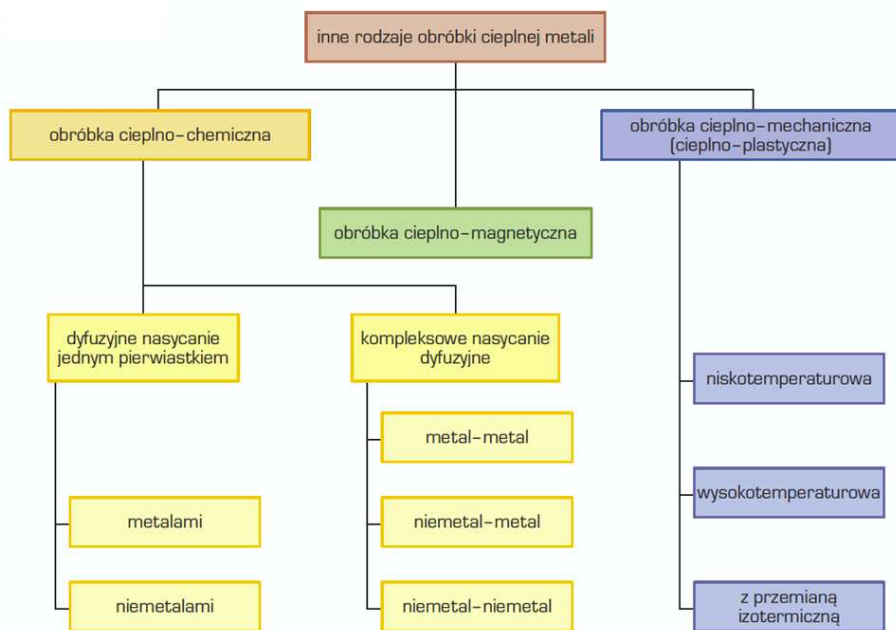
Rys. 10.17. Stop Ni-Ti (NiTiNOL) z pamięcią kształtu – na implanty medyczne. Struktura: martenzyt iglasty. Zgład trawiony: kwas octowy (lodowaty CH₃COOH) 30ml + azotowy HNO₃ 5ml + fluorowodorowy HF 2ml. Powiększenie mikroskopowe $\times 100$

11. Identyfikacja faz oraz właściwości warstwy wierzchniej stali po obróbce cieplno-chemicznej

11.1. Klasyfikacja innych rodzajów obróbki cieplnej

Uwzględniając czynniki, które wpływają na kształtowanie struktury oraz właściwości materiału, do innych rodzajów obróbki cieplnej zaliczamy (rys. 11.1):

- obróbkę cieplno-magnetyczną – istotne znaczenie odgrywa pole magnetyczne,
- obróbkę cieplno-mechaniczną (cieplno-plastyczną) – na właściwości obrabianego materiału wpływa dodatkowo odkształcenie plastyczne,
- obróbkę cieplno-chemiczną – ośrodek, w którym prowadzona jest obróbka cieplna istotnie wpływa na skład chemiczny oraz na strukturę wierzchniej warstwy.



Rys. 11.1. Inne rodzaje obróbki cieplnej metali [Dobr-02]

Obróbka cieplno-plastyczna (cieplno-mechaniczna) polega na połączeniu operacji hartowania i odkształcenia plastycznego. Najczęściej stosuje się

wysokotemperaturową obróbkę cieplno-mechaniczną (WOCM), polegającą na odkształceniu plastycznym w temperaturze wyższej od A_3 , oraz niskotemperaturową obróbkę cieplno-mechaniczną (NOCM), prowadzoną poniżej temperatury rekrytalizacji, lecz powyżej temp. od M_s . NOCM może być stosowana do stali, które wykazują dużą trwałość przechłodzonego austenitu. Po obróbce cieplno-mechanicznej stosuje się zazwyczaj niskie odpuszczenie.

Obróbka cieplno-chemiczna umożliwia, w czasie wygrzewania, połączonego z chemicznym oddziaływaniem środowiska grzewczego, zmianę składu chemicznego i struktury w powierzchniowej warstwie stopu, a dzięki temu zmianę jej właściwości. Celem obróbki cieplno-chemicznej jest nadanie warstwie powierzchniowej szczególnych właściwości fizycznych, głównie podwyższenie powierzchniowej twardości i odporności na ścieranie lub chemicznych, najczęściej odporności na utlenianie w wysokiej temperaturze lub odporności na działanie korodujące kwasów.

Metody obróbki cieplno-chemicznej wg różnych kryteriów przedstawiono w tabeli 11.1, a na rys. 11.2 z podziałem uwzględniającym rodzaj pierwiastka nasycającego.

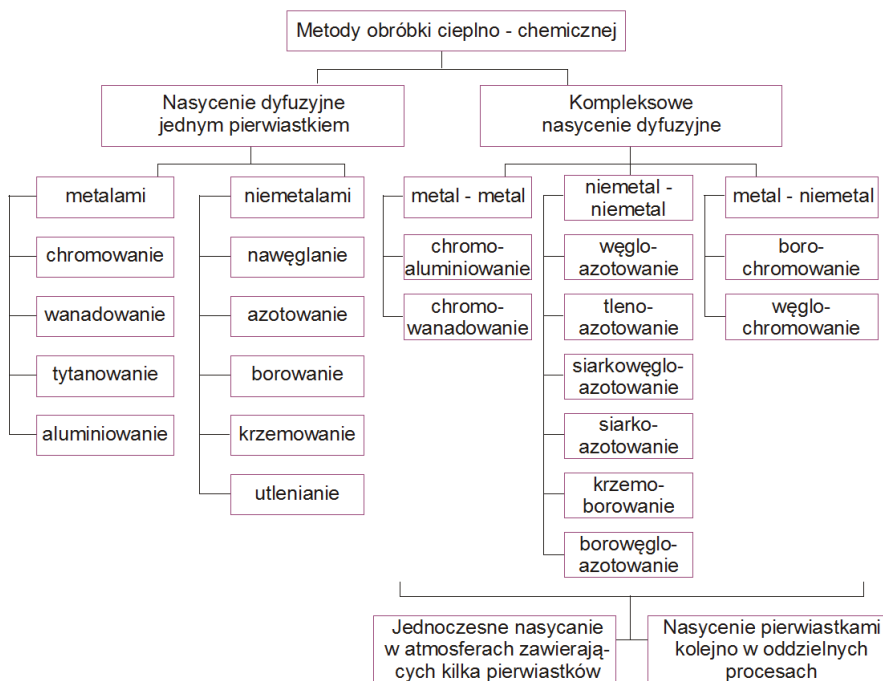
Tabela 11.1. Metody obróbki cieplno-chemicznej wg różnych kryteriów

Kryterium podziału	Metody obróbki cieplno-chemicznej
Stan środka nasycającego	W stałym ośrodku W ciekłym ośrodku W gazowym ośrodku
Rodzaje pierwiastków nasycających	Nasycenie metalami Nasycenie niemetalami Kompleksowe nasycenie niemetalami i metalami
Temperatura podczas procesu	Niskotemperaturowe (do 600 °C) Wysokotemperaturowe (powyżej 600 °C)
Liczba stosowanych w procesie cykli	Jednostopniowe Dwustopniowe Trójstopniowe
Metoda wytwarzania warstwy dyfuzyjnej	Regulowana Nieregulowana

Nawęglanie, a następnie hartowanie jest stosowane w przypadku przedmiotów ze stali o niskiej zawartości węgla do 0,3% (rys. 11.3). Przedmioty nawęglone poddane obróbce wykazują wysoką twardość i odporność na ścieranie wierzchniej warstwy, przy zachowaniu ciągliwego rdzenia. Grubość warstwy nawęglanej wynosi ok. 1,2÷1,5 mm. Przedmioty podczas nawęglania

nagrzewane są powyżej temperatury A_3 (zazwyczaj w zakresie $850 \div 1050^\circ\text{C}$) w środowisku tlenku węgla, w celu uzyskania węgla atomowego. Nawęglanie może być realizowane w ośrodkach: stałych, ciekłych, gazowych, w złożu fluidalnym, w próżni lub w plazmie.

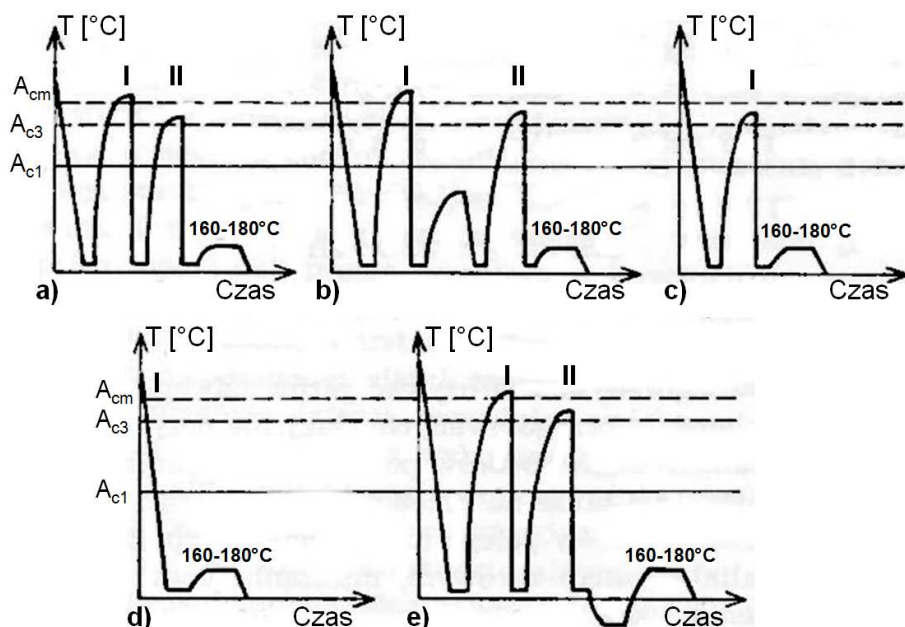
Dobór stali do nawęglania jest zwykle prowadzony ze względu na hartowność warstwy nawęglonej oraz rdzenia (PN-EN 10084:2008). Pierwiastki stopowe stosowane w celu zwiększenia hartowności stali nawęglanych to: Mn, Cr, Mo, Ni. Przykłady stali przeznaczonych do nawęglania przedstawiono w tabelach 10.5 i 10.6. Dodatek Mn i Cr zwiększa hartowność. Mangan zwiększa wytrzymałość rdzenia, a chrom przechodzi do węglików podwyższając twardość i odporność na ścieranie. Molibden wpływa na drobnoziarnistość oraz zapobiega kruchości odpuszczania II-go rodzaju. Nikiel poprawia ciągliwość rdzenia oraz warstwy nawęglonej.



Rys. 11.2. Metody obróbki cieplno-chemicznej z podziałem na rodzaj nasycającego pierwiastka [Dobr-02]

Miarą grubości warstwy utwardzonej przez nawęglanie jest zwykle głębokość mierzona od powierzchni do obszaru, gdzie stal ma określone właściwości. Odległość mierzona od powierzchni do miejsca, gdzie twardość po hartowaniu jest < 50 HRC lub zawartość węgla $< 0,4\%$, jest nazywana efektyw-

na grubością warstwy nawęglonej. Dominującym składnikiem mikrostruktury warstwy wierzchniej stali poprawnie nawęglonej i po obróbce cieplnej, jest wysokowęglowy martenzyt niskoodpuszczony. Mikrostrukturę rdzenia tworzyć mogą ferryt z perlitem, martenzyt odpuszczony lub bainit. Nawęglanie występuje w procesach technologicznych wytwarzania min. kół zębatach, wałków rozrządu, wałków zębatach oraz z wielowypustami, pierścieni oraz wałków łożysk tocznych o dużych wymiarach, sworzni tłokowych i kulistych.



Rys. 11.3. Schematy obróbki cieplnej po nawęglaniu [Wend-76]: a) dwukrotne hartowanie (I, II) z niskim odpuszczaniem, b) hartowanie I, wysokie odpuszczanie, hartowanie II, niskie odpuszczanie, c) jednokrotne hartowanie I z niskim odpuszczaniem, d) hartowanie I bezpośrednio z temperatury nawęglania, niskie odpuszczanie, e) dwukrotne hartowanie (I, II) z wymrażaniem i niskim odpuszczaniem

Azotowanie stosowane jest dla przedmiotów ze stali węglowych i stopowych, po obróbce wykończającej, w celu podwyższenia twardości powierzchni, odporności na ścieranie i uzyskania ogólnej odporności na korozję. Azotowanie realizowane jest w zakresie ferrytu, a nie w zakresie austenitu tak jak nawęglanie. Przeprowadza się poprzez nagrzewanie stali do temperatury w zakresie $480-600^{\circ}\text{C}$, w czasie $10-130\text{h}$, w obecności atomów azotu (najczęściej z amoniaku). Grubość warstwy nie przekracza na ogół $0,2\div 0,5\text{ mm}$.

Stale stopowe do azotowania zawierają dodatki Cr, Mo, V, Al, Ni (PN-EN 10085:2003). Przykład stali przeznaczonych do azotowania przedstawiono w tabelach 10.5 i 10.6. Trwałe azotki tworzą Al, Cr i Mo. Molibden zapobiega również kruchości odpuszczania II-go rodzaju, co jest ważne, ponieważ azotowanie jest procesem długotrwałym, po wcześniejszym ulepszaniu cieplnym. Dodatek wanadu przeciwdziała rozrostowi ziaren. Przed azotowaniem przedmioty są zwykle ulepszone cieplnie. Temperatura odpuszczania musi być dostatecznie wysoka, aby zapewnić stabilność mikrostruktury stali podczas azotowania. Minimalna temperatura odpuszczania przed azotowaniem jest zwykle, co najmniej 20-30°C, wyższa niż maksymalna temperatura podczas azotowania. Azotowanie prowadzi się w ośrodkach stałych (proszki), ciekłych (kąpielowe), gazowych oraz w plazmie. Warstwa azotowana charakteryzuje się najwyższą odpornością na ścieranie, gdy jest twarda i nie jest porowata. Struktura takiej warstwy zbudowana jest z azotków i węglikoazotków i wykazywać może wysoką twardość 800÷1200 HV_{0,05}.

Azotowane są części maszyn i narzędzia, narażone podczas eksploatacji na zużycie ścierne oraz narażone na korozję. Azotowane są elementy pomp i silników wytwarzanych w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i okrętowym, np. korbowody, wały korbowe, koła zębate, wałki, tłoki, pierścienie i sworznie tłokowe, tuleje cylindrowe, cylindry i nurniki pomp. W przemyśle obrabiarkowym: koła zębate, elementów przekładni ślimakowych i sprzęgieł elektromagnetycznych, wrzeciona i śruby pociągowe. Narzędzia, które są poddawane azotowaniu, to np. matryce kuźnicze, ciągadła oraz inne narzędzia do obróbki plastycznej, formy do tworzyw sztucznych oraz elementy wytłaczarek i wtryskarek. Przykładowe narzędzia skrawające wykonane ze stali szybkołatających, poddawane azotowaniu, to: narzędzia do obróbki kół zębatych, frezy, gwintowniki i wiertła.

11.2. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest identyfikacja struktury warstwy wierzchniej zestawu próbek stali poddanych nawęglaniu oraz azotowaniu w powiązaniu z ich właściwościami i zastosowaniem.

11.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień

1. Obróbka cieplno-chemiczna i jej zastosowanie.
2. Stale przeznaczone do nawęglania. Nawęglanie w ośrodkach stałych, ciekłych i gazowych. Procesy zachodzące przy nawęglaniu (absorpcja i dyfuzja węgla).

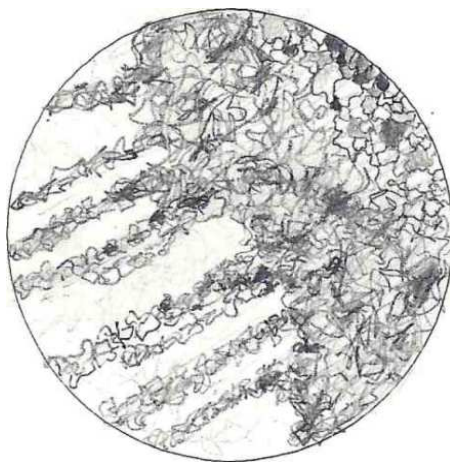
3. Głębokość warstwy nawęglonej w funkcji czasu i temperatury. Budowa warstwy nawęglonej oraz wady warstw nawęglonych.
4. Obróbka cieplna stali po nawęglaniu.
5. Stale przeznaczone do azotowania. Azotowanie konwencjonalne i jonowe.
6. Budowa warstwy wierzchniej stali po azotowaniu. Wady warstw po azotowaniu.
7. Inne procesy obróbki cieplno-chemicznej. Właściwości warstw po procesach obróbki cieplno-chemicznej.

11.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać:

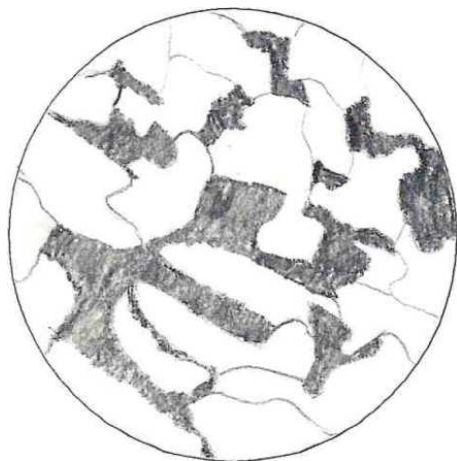
1. Istota nawęglania, temperatura procesu, rodzaj ośrodków, głębokość warstwy nawęglonej. Schematy obróbki cieplnej po nawęglaniu.
2. Układ równowagi fazowej Fe-N. Istota azotowania, temperatura procesu, rodzaj ośrodków, głębokość i twardość warstwy azotowanej.
3. Rysunki i opis struktur obserwowanych na zajęciach.
4. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

11.2.3. Obrazy mikrostruktury

Na rysunkach 11.4-11.5 przedstawiono przykładowe obrazy mikrostruktury stali stopowych i niestopowych przeznaczonych do nawęglania. Są to szkice struktury stopów pochodzące ze sprawozdań studenckich.



Rys. 11.4. Stal C10 niestopowa konstrukcyjna po nawęglaniu w ośrodku stałym. Struktura: od powierzchni perlit z cementytem wtórnym – perlit – perlityczno-ferrytyczna oraz rdzeń o budowie pasmowej ferrytyczno-perlitycznej. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



Rys. 11.5. Stal 17Cr3 stopowa konstrukcyjna do nawęglania. Struktura: ferryt stopowy i perlit stopowy. Zgład trawiony: 4% NITAL (4% HNO_3 w $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Powiększenie mikroskopowe $\times 500$

12. Analiza struktury stopów miedzi i stopów łożyskowych

12.1. Miedź i stopy miedzi

Miedź jest metalem o barwie czerwonej, posiada gęstość $8,96 \text{ g/cm}^3$, temperaturę topnienia 1083°C . Możliwa jest przeróbka plastyczna na zimno i na gorąco. Charakterystyczne właściwości miedzi, to wysoka przewodność elektryczna i cieplna oraz dobra odporność na korozję. W zależności od sposobu wytwarzania i oczyszczania, miedź o czystości technicznej zawiera 0,01-1,0% zanieczyszczeń. Miedź można podzielić na surową (konwertorowa lub katodowa), rafinowaną oraz przetopioną (beztlenowa, tlenowa i odtleniona). Poza tlenem we wszystkich rodzajach miedzi technicznej występują domieszki i zanieczyszczenia wielu pierwiastków (Bi, Pb, Sb, As, Fe, Ni, Sn, Zn, S i Ag), większość to zanieczyszczenia (z wyjątkiem srebra). Miedź zawierająca ten poniżej 0,003% określana jest jako beztlenowa. Wytwarzane są z niej elementy konstrukcyjne aparatury próżniowej, lamp elektronowych, przewody elektrotechniczne, itp. W zależności od czystości, inne rodzaje miedzi, stosowane są do wytwarzania elementów różnych konstrukcji oraz służą do produkcji stopów miedzi odlewniczych lub przerabianych plastycznie. Znaczna ilość miedzi stosowana jest do nakładania powłok galwanicznych na stali, zazwyczaj jako podwarstwa pod powłoki niklu lub niklowo-chromowe.

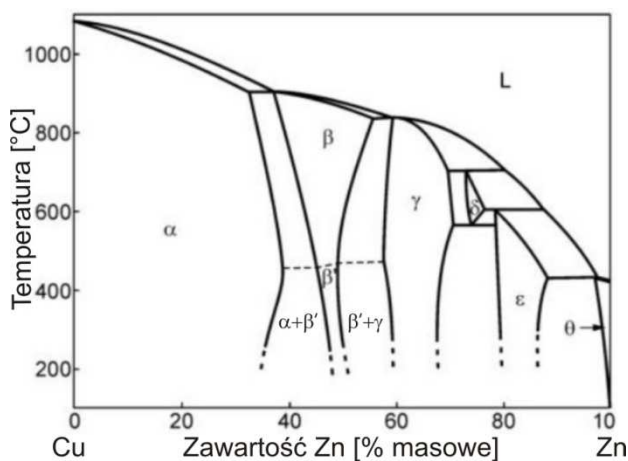
Pod względem przeznaczenia stopy miedzi można podzielić na odlewnicze i do przeróbki plastycznej. Stopy miedzi są oznaczane z wykorzystaniem symboli pierwiastków chemicznych (wg ISO 1190-1:1982). Znak stopów miedzi zaczyna się od symbolu chemicznego Cu, a następnie symbole chemiczne oraz liczby informujące o średnim stężeniu głównych dodatków stopowych (np. CuZn38Pb2). Możliwe jest też oznaczanie stopów Cu w systemie liczbowym (PN-EN 1412:2016-12). Ogólnie stopy miedzi dzielą się na:

- Stopy wstępne miedzi – to pomocnicze, dwu- lub trzyskładnikowe stopy, wytwarzane w celu ułatwienia we wprowadzeniu dodatków technologicznych lub stopowych.
- Miedź stopowa – to ogólna nazwa stopów przeznaczonych do przeróbki plastycznej, które zawierają poniżej 2% głównego dodatku stopowego. Wśród znormalizowanych gatunków klasyfikowana jest miedź arsenowa, niklowa, cynowa, chromowa, kadmowa, manganowa, siarkowa, tellurowa, srebrowa oraz cyrkonowa.

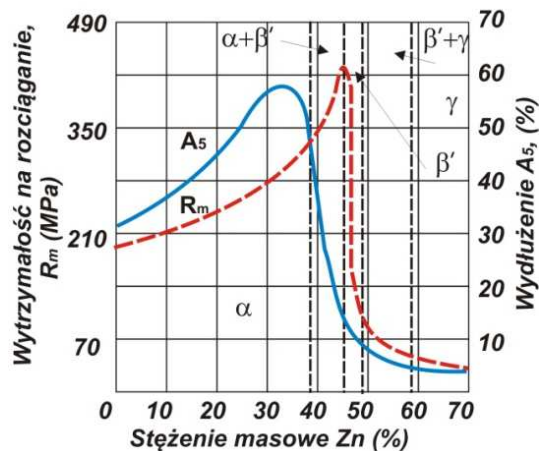
- Mosiądze – to stopy miedzi z cynkiem powyżej 2%, który jest głównym składnikiem stopowym (rys. 12.1a). Dzieli się na mosiądze odlewnicze (np. CuZn38Pb2 wg PN-EN 1982:2017-10) oraz do przeróbki plastycznej (np. CuZn15, CuZn37 wg PN-EN 1652:1999). Ta ostatnia grupa dzieli się jeszcze na dwuskładnikowe i wieloskładnikowe. Stopy wieloskładnikowe można podzielić na ołowiowe oraz bezołowiowe, nazywane też mosiádzami specjalnymi. Pojawienie się fazy β' , przy wzroście zawartości Zn, wpływa pogorszenie plastyczności mosiádzów (rys. 12.1b). Dlatego do przeróbki plastycznej na zimno (cienkie druty i blachy) stosowane są mosiądze o dobrej plastyczności w niskiej temperaturze, tzn. mosiądze jednofazowe, które zawierają około 30% Zn. Mosiądze, które zawierają ponad 32% Zn zwykle poddawane są przeróbce plastycznej na gorąco.
- Miedzionikle – to przerabialne plastycznie stopami miedzi, które zawierają nikiel ponad 2%, jako główny składnik stopowy (PN-H-87052:1992). Miedzionikle posiadają dobrą odporność na korozję i na ścieranie, wykazują dobrą plastyczność, dlatego wytwarza się z nich blachy, taśmy, pręty, rury i druty. Służą do produkcji monet (np. Cu-Ni25), elementów sprężynujących, połączeń wtykowych i przełączników, rur wymienników ciepła zwłaszcza w urządzeniach okrętowych, elementów aparatury i urządzeń klimatyzacyjnych, rezystorów w urządzeniach pomiarowych oraz elementów elektronicznych.
- Brązy – to stopy miedzi, z innymi pierwiastkami (ponad 2%) poza cynkiem i niklem. Główne dodatki stopowe, to np. cyna (rys. 12.2a), krzem, beryl, aluminium, ołów i inne. Od głównego składnika stopowego pochodzi nazwa brązów (cynowe, aluminiowe, berylowe itd.). Brązy są stosowane na odlewy (np. CuSn10P-C wg PN-EN 1982:2017-10) oraz przerabiane plastycznie (np. CuSn4 wg PN-H-87050:1992).

Wpływ zawartości cyny na właściwości mechaniczne brązów cynowych w stanie wyżarzonym przedstawiono na rys. 12.2b. Brązy z wyższą zawartością cyny stosowane są na odlewy. Struktura odlewniczych brązów cynowych znacznie odbiega od stanu równowagi fazowej z powodu zjawiska likwacji dendrytycznej. Brązy te wykazują znaczną odporność chemiczną, szczególnie na czynniki atmosferyczne, wykazują dobrą wytrzymałość i odporność na ścieranie, dlatego odlewnicze brązy cynowe stosowane są do wytwarzania armatury wodnej i parowej, panewek do łożysk ślizgowych, odlewów artystycznych i innych o skomplikowanym kształcie. Twardy eutektoid występujący w strukturze stopu zapewnia dużą odporność na ścieranie. Brązy zawierające ponad 10% Sn są jednym z najlepszych materiałów przeciwciernych, dlatego

stosowane są jako materiały na łożyska ślizgowe. Brązy cynowe przeznaczone do przeróbki plastycznej wykazują wysoką wytrzymałość, są sprężyste oraz wykazują dobrą odporność na korozję i ścieranie. Wzrost zawartości cyny wpływa na wzrost tych właściwości (rys. 12.2b).



a)

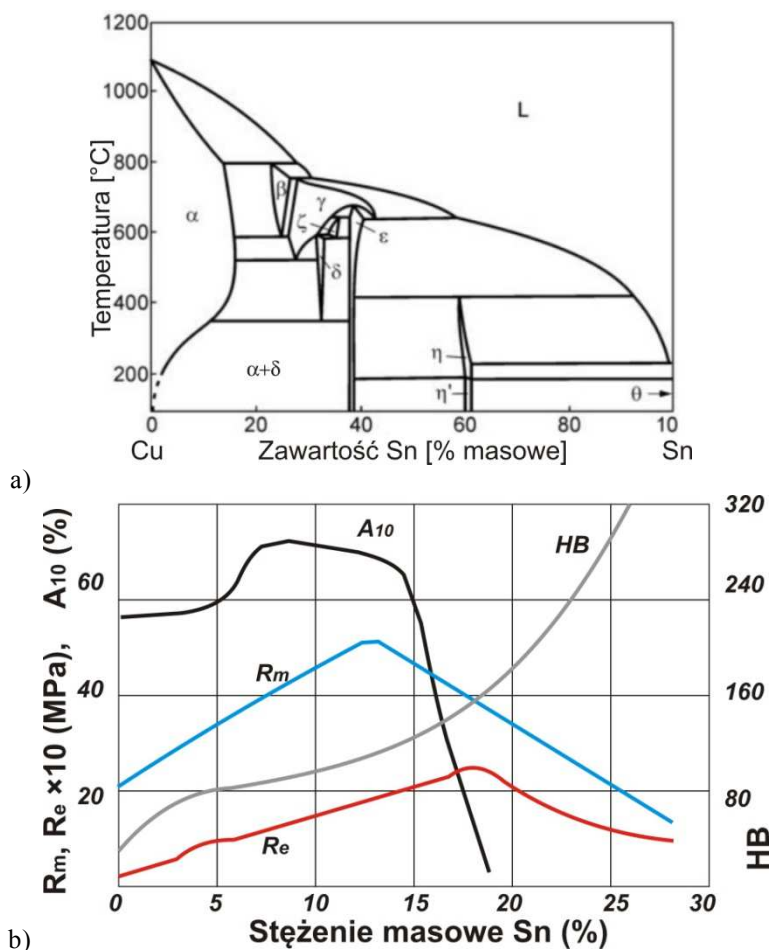


b)

Rys. 12.1. Układ równowagi fazowej Cu-Zn (a) [Blic-17]; właściwości mosiądzów (b) [Huci-95]

Brązy aluminium stosowane są jako odlewy oraz do przeróbki plastycznej (np. CuAl10Fe1 wg PN-EN 1982:2017-10). Wyróżniamy brązy dwu-

składnikowe, które zawierają 4-8% Al, oraz wieloskładnikowe, które zawierają zazwyczaj żelazo, nikiel, mangan oraz inne dodatki (np. CuAl10Ni5Fe4). Cechują się wysoką wytrzymałością i plastycznością w temperaturze otoczenia, jak również w podwyższonej temperaturze, posiadają dobrą odporność na ścieranie i korozję. Odlewnicze brązy aluminiowe stosowane są na silnie obciążone części maszyn, silników oraz części różnej aparatury i osprzętu, w środowisku korozyjnym, które są narażone na ścieranie i jednocześnie obciążone mechanicznie.



Rys. 12.2. Układ równowagi fazowej Cu-Sn (a) [Blic-17]; właściwości stopu Cu-Sn w stanie wyżarzonym (b) [Wend-76]

W brązach ołowiowych stosuje się do 30% ołowiu oraz inne dodatki w postaci cyny, manganu, niklu, i inne (np. CuPb20Sn5-C). Charakteryzują się dobrą odpornością na korozję, są dobrze obrabialne, a przede wszystkim wykazują dobrą odporność na ścieranie. Służą do wytwarzania tulejek i panewek w silnie obciążonych maszynach i urządzeniach.

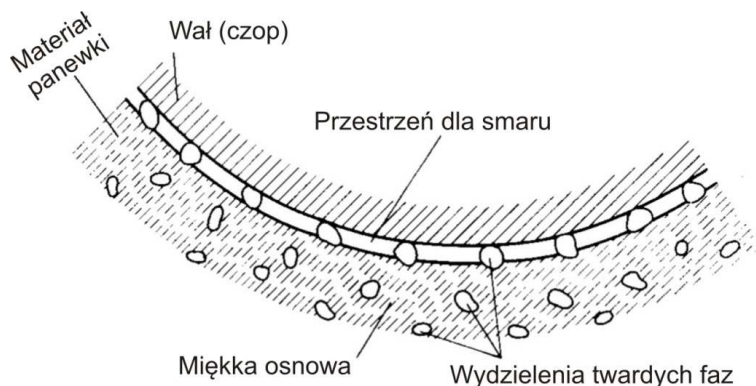
Brązy manganowe zachowują wysoką twardość i ciągliwość w wysokiej temperaturze. Stosowane są do budowy maszyn parowych, silników spalinowych i turbin, również w przemyśle elektrotechnicznym (sprężyny, szczotki, kontakty), itd. Stop zawierający 85% Cu, 12% Mn i 3% Ni (CuMn12Ni3), zwany jest manganinem – charakteryzuje się wysokim oporem elektrycznym.

Miedź z dodatkiem niklu (do 41%), cynku (do 28%), manganu (do 13%), aluminium (do 3,6%) i żelaza (do 1,5%), to stopy odporowe. Wykazują wysoki opór elektryczny (rezystywność) i niski współczynnik cieplny oporu oraz stabilność obu tych właściwości. Ze stopów tych wytwarza się elektryczne rezystory pomiarowe i rozruszniki. Posiadają jednofazową strukturę. Występują pod różnymi nazwami, jak nikielina (CuNi19), konstantan (CuNi40Mn1), manganin (CuMn12Ni2) oraz nowe srebro (Cu oraz 5-40% Zn i 10-20% Ni).

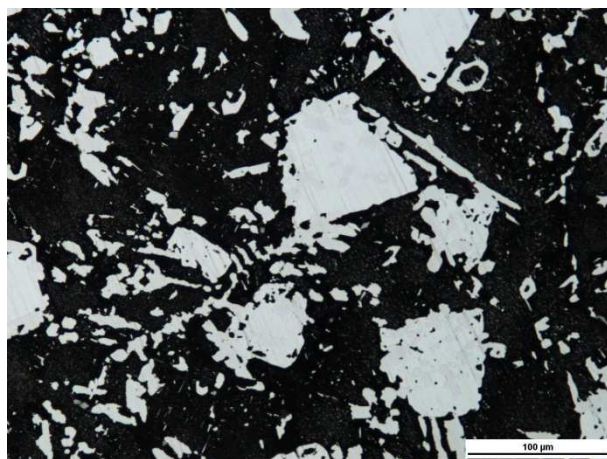
12.2. Stopy łożyskowe

Stopy łożyskowe, to specjalna grupa materiałów, które stosowane są do wytwarzania i wylwania panewek łożysk ślizgowych. Z uwagi na warunki w jakich pracują łożyska ślizgowe, stopy te muszą wykazywać szczególne właściwości: niski współczynnik tarcia pomiędzy powierzchnią czopa wału, wysoka odporność na ścieranie, powinien posiadać dostateczną wytrzymałość w podwyższonej temperaturze (do 200 °C). Powinny wykazywać dostatecznie wysoką odporność na korozję. Nie mogą wykazywać skłonności do likwacji składników podczas ich odlewania. Od stopów łożyskowych wymagane jest posiadanie wysokiej twardych materiałów aby zapewnić dostatecznie wysoką wytrzymałość i niski współczynnika tarcia, a jednocześnie powinny być na tyle miękkie aby umożliwić panewce dostosowanie się do kształtu czopa wału. Takie przeciwne wymagania mogą być uzyskane jedynie w stopach o strukturze złożonej z co najmniej z dwóch lub więcej faz o zróżnicowanych właściwościach – przykładowo, miękkie podłoże oraz możliwie równomiernie rozmieszczone wydzielienia twardych kryształów innej fazy (rys. 12.3). Podczas pracy kryształy twardej fazy przejmą obciążenie i przekażą je na całą panewkę. Znaczna ilość tych kryształów spowoduje powstanie między powierzchnią czopa wału, a powierzchnią panewki niewielkiej przestrzeni, w której przebywać będzie smar. Gdy poszczególne części panewki będą przeciążone, spowoduje to wgniatanie twardych kryształów w miękką osnowę, a przez to nastąpi zwięk-

szenie powierzchni kontaktu między czopem i obniżeniu ulegną naciski powierzchniowe.



a)



b)

Rys. 12.3. Schemat panewki ze stopem łożyskowym (a) [Rudn-98]; struktura stopu łożyskowego SnSb11Cu6 (zgląd trawiony: 5% HCl w C₂H₅OH) – ciemna osnova, to roztwór stały antymonu w cynie oraz jasne wydzielения faz międzymetalicznych (grube SnSb i drobne Cu₆Sn₅) (b)

W praktyce przemysłowej, jako stopy łożyskowe stosowane są żeliwa, brązy oraz niskotopliwe stopy, zwane babbitymi (wg PN-ISO 4381:1997) na osnowie cyny (np. SnSb12Cu6Pb), ołowiu (np. PbSb15SnAs) oraz stopy cynku (np. ZnAl10Cu5) lub aluminium (AlSn20Cu). Żeliwa szare perlityczne są stosowane na panewki, jest to materiał tani, jest w stanie przenosić duże naciski

jednostkowe, jednak z uwagi na wysoki współczynnik tarcia żeliwo nie może być stosowane na łożyska wysokoobrotowe.

Stopy łożyskowe dobiera się ze względu na warunki pracy łożyska, uwzględniając obciążenia statyczne i dynamiczne. Przykładowo dla stopu SnSb11Cu6: dopuszczalne naciski są do 10 MPa, prędkość obwodowa może być powyżej 5 m/s. Parametr charakteryzujący łożyska ślizgowe, to iloczyn prędkości i nacisku, dla tego stopu powinien być poniżej 50 MPa×m/s. Stopy takie są odlewane są odśrodkowo, w postaci taśm bimetalowych na panewki w łożyskach ślizgowych znacznie obciążonych.

12.3. Część praktyczna

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z właściwościami i strukturą stopów miedzi oraz stopów łożyskowych cynowych oraz bezcynowych w powiązaniu z układami równowagi fazowej.

12.3.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:

1. Właściwości i zastosowanie czystej miedzi.
2. Mosiądze: definicja, właściwości, zastosowanie, znakowanie wg PN i PN-EN.
3. Brązy: definicja właściwości, zastosowanie, znakowanie wg PN i PN-EN.
4. Miedzionikle: definicja właściwości, zastosowanie, znakowanie wg PN i PN-EN.
5. Wymagania odnośnie struktury i właściwości stawiane stopom stosowanym na łożyska ślizgowe.
6. Struktura, właściwości oraz podział i znakowanie stopów łożyskowych (babbitów) wg PN i PN-EN.
7. Charakterystyka innych stopów stosowanych na łożyska ślizgowe (żeliwa szare perlityczne, brązy cynowe i ołowiowe, stopy cynku i aluminium oraz spieki).

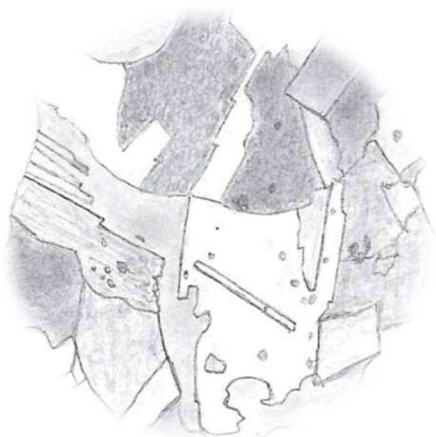
12.3.2. Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Układy równowagi fazowej Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Al
3. Podział oraz znakowanie wg PN i PN-EN mosiądzów, brązów i miedzionikli.
4. Wymagania stawiane stopom łożyskowym. Schemat łożyska ślizgowego (czop-panewka).
5. Podział oraz znakowanie stopów łożyskowych wg PN i PN-EN.

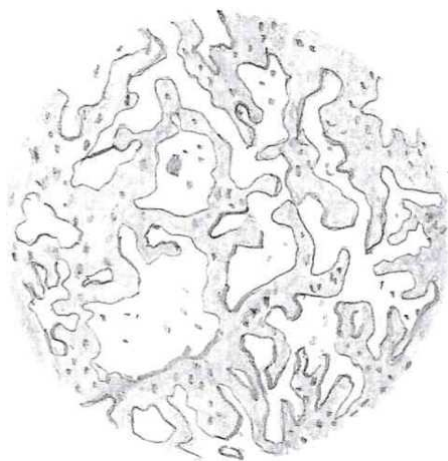
6. Rysunki struktur wykonane na ćwiczeniu z analizą budowy strukturalnej oraz przykładami zastosowań badanych stopów.
7. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

12.3.3. Obrazy mikrostruktury

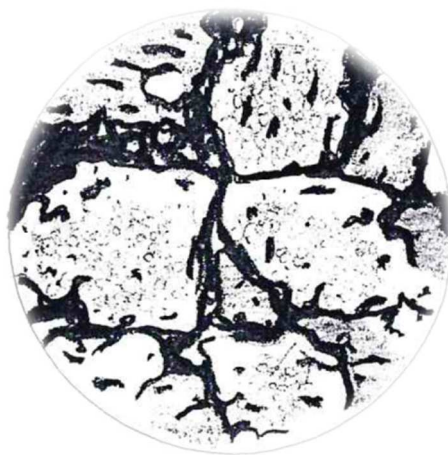
Na rysunkach 12.4-12.8 przedstawiono przykładowe obrazy mikrostruktury stopów miedzi oraz stopów łożyskowych. Są to szkice struktury stopów pochodzące ze sprawozdań studenckich.



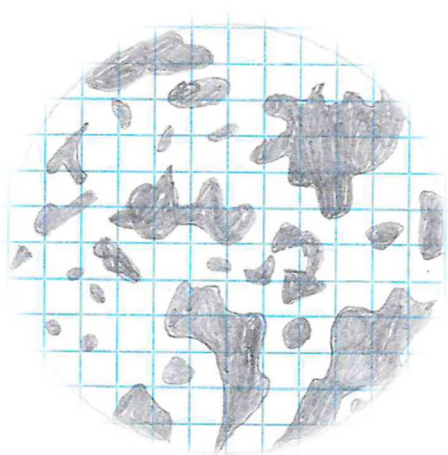
Rys. 12.4. Miedź katodowa Cu-ETP – przetopiona, po przeróbce plastycznej i rekrytalizacji. Struktura: ziarna miedzi (z bliźniakami) oraz drobne wtrącenia ołowiu. Zgład trawiony: 10 g FeCl_3 + 30 ml HCl + 100 ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



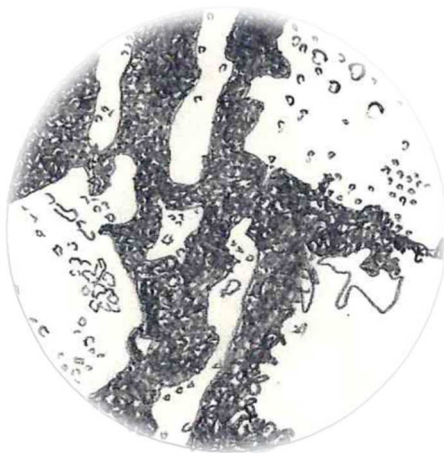
Rys. 12.5. Mosiądz CuZn38Pb2 w stanie lanym. Struktura: jasne ziarna roztworu α w osnowie fazy β' oraz wtrącenia ołowiu. Zgląd trawiony: 10 g FeCl_3 + 30 ml HCl + 100 ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 12.6. Brąz aluminiumo-żelazowy CuAl9Fe3 w stanie lanym. Struktura: jasne ziarna roztworu α z drobnymi wtrąceniami fazy międzymetalicznej FeAl_3 , ciemny eutektoid ($\alpha + \gamma'$) na granicach ziaren roztworu α . Zgląd trawiony: 10 g FeCl_3 + 30 ml HCl + 100 ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 12.7. Stop łożyskowy – brąz ołowiowy CuPb30 w stanie lanym. Struktura: jasna osnova – dendryty miedzi oraz ciemne wydzielienia ołowiu, pory odlewnicze. Zgląd nietrawiony. Powiększenie mikroskopowe $\times 400$



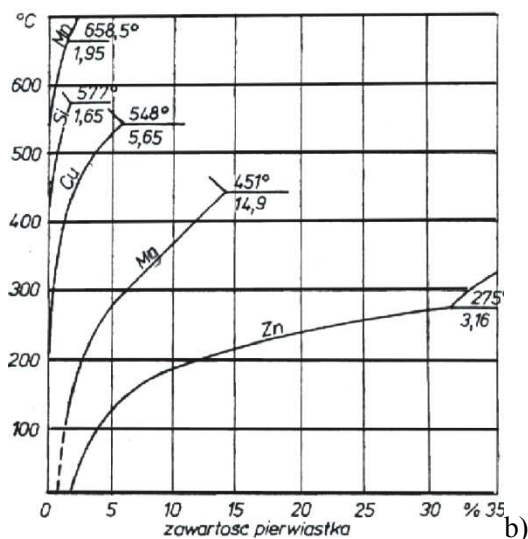
Rys. 12.8. Stop łożyskowy – babbitt cynowy SnSb11Cu6. Struktura: ciemna osnova roztworu stałego antymonu w cynie, wydzielienia fazy międzymetalicznej SnSb (duże, jasne trójkąty i czworokąty) oraz wydzielienia fazy międzymetalicznej Cu₆Sn₅ (drobne, iglaste). Zgląd trawiony: 5% HCl w C₂H₅OH. Powiększenie mikroskopowe $\times 500$

13. Stopy aluminium z miedzią, krzemem i magnezem

13.1. Wprowadzenie

Aluminium to pierwiastek metaliczny, krystalizujący w układzie regularnym (Al), posiada gęstość $2,7 \text{ g/cm}^3$, temperatura topnienia 660°C , a wrze w temperaturze 2450°C . Jest metalem lekkim i plastycznym, posiada dobrą przewodność elektryczną i ciepłą. Posiada dobrą odporność na korozję, na działanie wody oraz na niektóre kwasy organiczne, dwutlenek siarki i inne związki chemiczne. Odporność korozyjną aluminium (a także jego stopów) można podwyższyć wytwarzając powłoki tlenkowe metodami chemicznymi lub elektrochemicznie.

Aluminium ma blisko trzykrotnie mniejszą gęstość od stali oraz niższą wytrzymałość ($R_m = 70\text{--}110 \text{ MPa}$, $R_e = 30\text{--}40 \text{ MPa}$ i niski moduł E). Stopy aluminium mają znacznie szersze zastosowanie niż czyste aluminium (rys. 13.1). Są obecnie drugą grupą, po stopach żelaza, najbardziej rozpowszechnionych materiałów konstrukcyjnych we wszystkich gałęziach przemysłu, szczególnie w budowie statków i samolotów. Składniki stopowe powodują podwyższenie właściwości wytrzymałościowych i obniżenie plastyczności i podatności na obróbkę plastyczną.



Rys. 13.1. Fragmenty układów równowagi fazowej stopów aluminium [Huci-95]

W zależności od metody wytwarzania wyróżnia się stopy aluminium:

- Przerabiane plastycznie (wg PN-EN 573-3:2004), które można podzielić na dwie podgrupy:
 - stopy, które się stosuje bez obróbki cieplnej,
 - stopy podawane utwardzaniu dyspersyjnemu.

Sposób oznaczania tej grupy stopów aluminium składa się ze znaku EN AW-Al następnie podawane są symbole chemiczne pierwiastków dodatków stopowych, a po tych symbolach znajdują się liczby, które oznaczają średnie nominalne stężenia głównego oraz kolejnych składników (np. EN AW-AlCu5,5MgMn). Odmiany stopu oznacza się dodatkową literą na końcu znaku (np. EN AW-AlMg0,7Si(A)). Podawany może być też skrócony symbol, który informuje o stanie obróbki plastycznej lub cieplnej (według PN-EN 515:2017-05).

- Stosowane jako odlewy (wg PN-EN 1706:2010) – jest 12 znormalizowanych gatunków. Wyróżniamy stopy dwuskładnikowe (Al-Si, Al-Mg i Al-Cu), a także wieloskładnikowe (Al-Si-Cu, Al-Cu-Ni, Al-Si-Mg, Al-Cu-Ni-Mg i Al-Si-Cu-Mg-Ni).

Stopy odlewnicze (wg PN-EN 1780-1:2003 i PN-EN 1780-2:2003) oznaczane są podobnie, jak stopy do obróbki plastycznej – znak zaczyna się od symbolu EN-AC, np. EN AC-ALSi5Cu3Mn. Na końcu znaku może występować symbol dotyczący sposobu odlewania (S – w formach piaskowych, L – metodą wytapianych modeli, K – w formach kokilowych, D – pod ciśnieniem) oraz rodzaju zastosowanej obróbki cieplnej.

Podział stopów aluminium na grupy, ich nazwy, znaki, oznaczenia numeryczne oraz główne składniki stopowe podstawowych na podstawie norm (PN-EN 1780-1:2003):

- Czyste aluminium (**seria 1xxx**) – hutnicze i rafinowane. Aluminium o czystości technicznej zawierać może 0,01-1,0% zanieczyszczeń. Są to głównie Fe, Cu, Zn, Si, i Ti oraz w mniejszej ilości Mg, Cr, V, Pb, Mn, i Ni), które występują w zależności od zastosowanej metody oczyszczania. Z aluminium technicznie czystego budowana jest specjalna aparatura chemiczna oraz wyroby dla elektroniki i elektrotechniki. Czyste aluminium jest bardzo plastyczne, posiada niską wytrzymałość, z tego powodu ma ograniczone zastosowanie w budowie maszyn.
- Durable (**seria 2xxx**) – stopy Al-Cu. Durable dwuskładnikowe wykazują dobrą lejność i stosunkowo dobrą plastyczność oraz niską wytrzymałość. Stopy Al-Cu mogą być poddawane przesycaniu i starzeniu, które powoduje znaczny wzrost właściwości wytrzymałościowych oraz obni-

żenie plastyczności. Zastosowanie durali jest ograniczone ze względu na niską odporność korozyjną. Wytwarza się z nich galanterię stołową oraz inne odlewy o dobrej plastyczności. Przemysłowo stosowane są głównie stopy wieloskładnikowe, z których wytwarzane są m.in. odlewy średnio i wysoko obciążonych części maszyn i pojazdów mechanicznych, taboru kolejowego, a także w budownictwie. Duralale z dodatkiem cynku, to najbardziej wytrzymałe stopy aluminium (wytrzymałość po obróbce cieplnej $R_m = 600 \text{ MPa}$), są one jednak mniej podatne do przeróbki plastycznej oraz wykazują obniżoną odporność na korozję naprężeniową. Blachy z duralu są zabezpieczane przed korozją poprzez platerowanie specjalnym stopem (Al-Zn).

- **Alumany (seria 3xxx)** – stopy Al-Mn. Są plastyczne oraz dobrze się tłoczą, lecz niewiele przewyższają wytrzymałość czystego aluminium. Mogą być umacniane poprzez zgniot. Mangan podwyższa odporność korozyjną aluminium, dlatego są odporne na korozję atmosferyczną i w wodzie morskiej oraz na działanie olejów i paliw. Są spawalne. Stosowane są w lotnictwie do budowy zbiorników, przewodów i elementów łącznych instalacji paliwowych i olejowych. Wykonywane są z nich owiewki, pływak i pokrycia kadłubów hydroplanów.
- **Siluminy (seria 4xxx)** – stopy Al-Si. Ze względu na zawartość krzemu wyróżniamy siluminy o strukturze podeutektycznej (do 10% Si), eutektycznej (10-13 %Si) i nadeutektycznej (17-30 %Si), co wynika z układu równowagi fazowej Al-Si. W niektórych siluminach, poza krzemem, może występować w niewielkiej ilości dodatek Cu, Mg, oraz sporadycznie Ni, Mn i Ti. Siluminy posiadają doskonałe właściwości odlewnicze, tj. dobrą lejność, niewielki skurcz liniowy oraz małą skłonność do pęknięcia na gorąco. Dlatego są szeroko stosowane na głowice i cylindry silników spalinowych oraz tłoki silników spalinowych, części różnych maszyn, armaturę okrętową, itd. Wykazują dobre właściwości mechaniczne oraz dostatecznie dobrą odporność na korozję. Siluminy rzadko są poddawane obróbce cieplnej, a właściwości mechaniczne podwyższane są w wyniku zabiegu modyfikowania w stanie ciekłym.
- **Hydronalia (seria 5xxx)** – stopy Al-Mg. Są lekkie, posiadają wysoką wytrzymałość, dobrą plastyczność oraz wysoką udurowalność. Są poddawane przeróbce plastycznej na zimno i na gorąco. Mogą też być poddawane obróbce cieplnej (przesycanie i starzenie). Można uzyskać ładny połysk poprzez polerowanie. Wykazują bardzo dobrą odporność na korozję. Znajdują zastosowanie w warunkach, gdzie narażone mogą być na działanie wody morskiej, środków chemicznych. Służą do wytwarzania

elementów konstrukcji w przemyśle stoczniovym, chemicznym, spożywczym, meblarskim, środków transportu, a także do budowy samolotów.

- Anticorodale (**seria 6xxx**) – stopy Al-Mg-Si. Charakteryzują się dobrą plastycznością przy stosunkowo wysokich parametrach wytrzymałościowych, które uzyskuje się dzięki obróbce cieplnej. Są odporne na korozję i nie wymagają platerowania. Stosowane są w budownictwie, wykończeniu wnętrza, sprzęcie AGD oraz transporcie.
- Konstrukcyjne (**seria 7xxx**) – stopy Al-Zn. Zawierać też mogą Cu, Ti lub Mn. Po odpowiedniej obróbce cieplnej uzyskują lepsze właściwości wytrzymałościowe, lecz niższą odporność na korozję. Po procesach spawania następuje znikome pogorszenie właściwości wytrzymałościowych, gdyż spoina i strefa wpływu ciepła utwardza się w sposób naturalny po pewnym czasie od momentu spawania.
- Pozostałe (**seria 8xxx**). Najnowszą generację stanowią stopy aluminium z litem. Poprzez zastosowanie litu uzyskano stopy o gęstości znacznie niższej od aluminium. Po przesycaniu i starzeniu stopów podwójnych, zawierających 2,0-2,5 % Li, uzyskuje się optymalną wytrzymałość i plastyczność ($R_m = 160 \text{ MPa}$, $R_e = 100 \text{ MPa}$, $A = 14\%$). Stosując zgniot po przesycaniu uzyskuje się wzrost wskaźników wytrzymałościowych, lecz także spadek plastyczności. Podobny efekt uzyskuje się gdy zwiększamy zawartości litu. Stopy aluminium z litem stosowane są w budowie samolotów, głównie jako cienkie blachy na poszycia skrzydeł oraz kadłubów.

13.2. Część praktyczna

Ćwiczenie polega na zapoznaniu się z właściwościami i strukturą stopów aluminium w powiązaniu z układami równowagi fazowej.

13.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień.

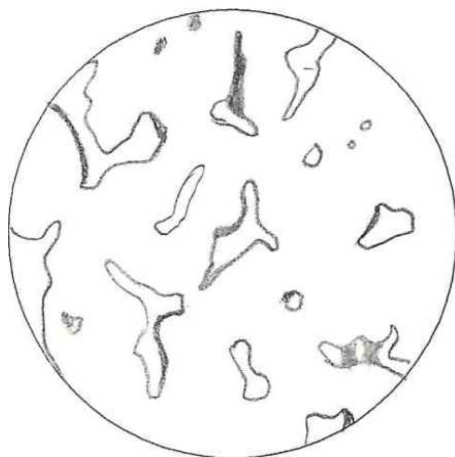
1. Właściwości i zastosowanie czystego aluminium.
2. Podział oraz znakowanie stopów aluminium wg PN i PN-EN.
3. Stopy aluminium z miedzią i innymi składnikami. Obróbka cieplna stopów aluminium (przesycanie i starzenie durali).
4. Stopy aluminium z krzemem. Modyfikacja siluminów.
5. Charakterystyka innych stopów aluminium (Al-Mg, Al-Mn, Al-Mg-Si, Al-Zn).

13.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać.

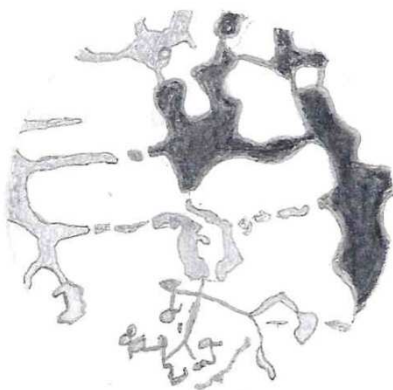
1. Cel ćwiczenia.
2. Rysunek fragmentu układów Al-Cu i Al-Si.
3. Podział i sposób znakowania stopów aluminium wg PN i PN-EN.
4. Rysunki struktur wykonane na ćwiczeniu z analizą budowy strukturalnej oraz przykładami zastosowań stopów.
5. Wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

12.3.3. Obrazy mikrostruktury

Na rysunkach 13.2-13.5 przedstawiono przykładowe obrazy mikrostruktury stopów aluminium. Są to szkice struktury stopów pochodzące ze sprawozdań studenckich.



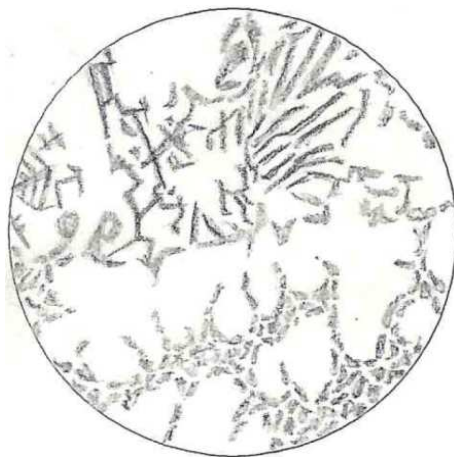
Rys. 13.2. Dural EN AC-AlCu4 w stanie lanym. Struktura: wydzielania fazy międzymetalicznej Al_2Cu w osnowie roztworu α . Zgład trawiony: roztwór 0,5ml HF w 99,5ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



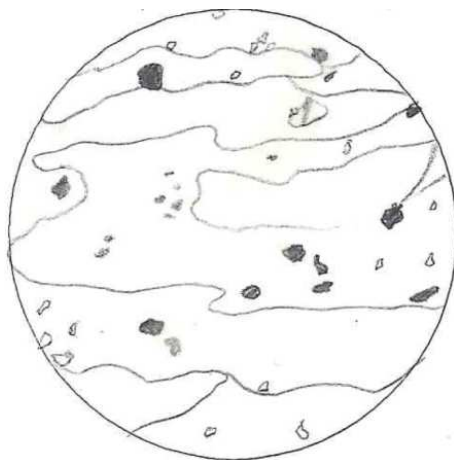
Rys. 13.3. Silumin EN AC-ALSi5Cu w stanie lanym. Struktura: roztwór α otoczony eutektyką ($\alpha + \text{Si}$), wydzielienia międzymetalicznej fazy żelazowej AlFeSi oraz pory odlewnicze. Zgląd trawiony: roztwór 0,5ml HF w 99,5ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 13.4. Silumin EN AC-ALSi10 w stanie lanym, niemodyfikowany. Struktura: gruboziarnista eutektyka ($\alpha + \text{Si}$). Zgląd trawiony: roztwór 0,5ml HF w 99,5ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 13.5. Silumin EN AC-AlSi10 w stanie lanym, modyfikowany. Struktura: roztwór α oraz drobnoziarnista eutektyka ($\alpha + \text{Si}$). Zgład trawiony: roztwór 0,5ml HF w 99,5ml H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 500$



Rys. 13.5. Hydronalium EN AW-AlMg3 po przeróbce plastycznej na zimno. Struktura: wydłużone ziarna roztworu α oraz wydzielienia fazy międzymetalicznej Al_8Mg_3 . Zgład trawiony: roztwór 1%HF + 1,5%HCl + 2,5% HNO_3 w H_2O . Powiększenie mikroskopowe $\times 400$

14. Próba statyczna rozciągania polimerów termoplastycznych

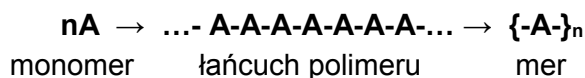
14.1. Materiały polimerowe – wprowadzenie

Polimer (gre. *poli* – wiele, *meros* – części), to substancja chemiczna o bardzo dużej masie cząsteczkowej, składająca się z powtórzonych wielokrotnie jednostek (merów). Określane też jako związki wielocząsteczkowe, makromolekuły, makrocząsteczki. Bardzo duża masa cząsteczkowa, rozumiana jest tak, że gdy odejmiemy lub przyłączymy jeden mer, nie zmieni to właściwości fizycznych i chemicznych takiego związku chemicznego.

Materiały polimerowe możemy podzielić na:

- naturalne polimery (biopolimery): kauczuki (np. gutaperka, poliizopren), polisacharydy, kwasy nukleinowe, peptydy i białka,
- syntetyczne (np. polietylen, poliwęglan),
- modyfikowane – to materiały na bazie polimerów naturalnych lub syntetycznych, w których na drodze chemicznej lub fizycznej, zmieniono strukturę ich powierzchni lub całą objętość polimeru.

Polimeryzacja polega na łączeniu się związków małych cząsteczkowych w makrocząsteczki w postaci długich łańcuchów lub sieci przestrzennych trójwymiarowych. Małe cząsteczki, które są substratami do budowy makrocząsteczek, nazywane są monomerami, np. cząsteczka etylenu jest monomerem przy powstawaniu polietylenu. Na rysunku 14.1 przedstawiono ogólne równanie reakcji polimeryzacji. W nawiasie, zaznaczono podstawową jednostkę strukturalną (mer), natomiast n , to liczba merów, która wchodzi w skład łańcucha polimeru oraz liczba monomerów (substratów reakcji).



Rys. 14.1. Schemat ogólny procesu polimeryzacji

W trakcie reakcji polimeryzacji związek chemiczny, posiadający małą masę cząsteczkową tzn. monomer lub mieszanina kilku monomerów, reagują ze sobą, aż wyczerpaniu ulegną wolne grupy funkcyjne, w efekcie dochodzi do powstania makrocząsteczki, która posiada masę cząsteczkową wielokrotnie wyższą od substratów i określana jest jako polimer. Do reakcji polimeryzacji zaliczamy:

- Polimeryzację addycyjną (poprzez dodawanie) – polega na szybkiej „reakcji łańcuchowej” monomerów. Zachodzi bez produktów ubocznych.
- Polimeryzacja kondensacyjna (polikondensacja) – polega na indywidualnych reakcjach chemicznych między poszczególnymi parami monomerów z powstaniem ubocznego produktu niskocząsteczkowego. Jest procesem znacznie wolniejszym od addycyjnej.

Masę jednego mola atomów wchodzących w skład jednostki strukturalnej (meru), wyrażoną w g/mol nazywamy masą molową meru (M). W przypadku polimerów addycyjnych masa molowa meru jest równa masie molowej monomeru. Czasami pojęcie jednostki strukturalnej zastępowane są określeniami:

- jednostka powtarzalna,
- jednostka konstytucyjna,
- jednostka monomeryczna.

Ze względu na to w jaki sposób technicznie jest przeprowadzana, rozróżnia się polimeryzację:

- w roztworze – środowiskiem jest odpowiednio dobrany rozpuszczalnik, w którym dochodzi do rozpuszczenia się monomeru i inicjatora,
- emulsyjną – monomery w postaci miceli, a inicjator jest w roztworze właściwym. Produktem jest lateks, który może być gotowym produktem końcowym lub, z którego polimer wyodrębnia się poprzez koagulację emulsji,
- w zawieszynie – monomer w postaci kropli zawieszonych w roztworze, a inicjator jest wewnątrz tych kropli. Zawiesina powstaje podczas intensywnego mieszania monomeru w substancji, w której nie rozpuszcza się monomer i inicjator (zwykle jest to woda). Do polimeryzacji dochodzi wewnątrz kropelek monomeru, dając gotowy polimer w postaci granulatu,
- w bloku – do ciekłego monomeru dodawany jest inicjator. Po polimeryzacji tworzy się lity blok polimeru, który może być produktem końcowym lub poddawany jest granulacji,
- w fazie gazowej – monomery w postaci gazów o niskiej temperaturze krytycznej. Po polimeryzacji tworzy się zazwyczaj pył polimeru, który po odfiltrowaniu topi się i granuluje,
- na granicy faz – monomer jako jedna faza ciekła, a inicjator jako druga. Polimeryzacja na granicy kontaktu obu faz. Tworzący się polimer jest usuwany z obszaru reakcji tak, aby utrzymywana była duża powierzchnia stykających się faz. Produktem są bardzo cienkie folie lub włókna.

Polimery można klasyfikować w różny sposób zależnie od założonego kryterium podziału. Można dokonać ich klasyfikacji ze względu na budowę chemiczną, fizyczną lub właściwości reologiczne.

Ze względu na chemiczną budowę, według budowy łańcucha głównego wyróżniamy polimery:

- z łańcuchami homogenicznymi, np. $-C-C-C-C-C-C-C-$; $-Si-Si-Si-Si-Si-$
- z łańcuchami heterogenicznymi, np. $-C-O-C-N-C-S-$

Ze względu na budowę topologiczną, polimery dzielimy na:

- liniowe – łańcuchy nie posiadają rozgałęzień, mogą mieć grupy boczne,
- rozgałęzione – rozgałęzienia łańcuchów tworzą się trakcie polimerizacji polimerów homogenicznych oraz w kopolimerach szczepionych,
- usieciowane – pomiędzy łańcuchami tworzą się poprzeczne połączenia kowalencyjne, tworząc sieć przestrzenną, jako jedna ogromna cząsteczka (duży stopień usieciowania) z węzłami sieci 3- lub 4-funkcyjnymi,
- o budowie drabinkowej, grzebieniowej, pierścieniowej – składające się ze skondensowanych pierścieni aromatycznych. Zalicza się je do termoodpornych polimerów.

Polimery liniowe lub rozgałęzione mięknią przy wzroście temperatury topnieją i płyną, zwane są polimerami termoplastycznymi (np. polietylen, polistyren, ABS). Dają się łatwo formować wieloma metodami przetwórczymi. Najczęściej ulegają rozpuszczaniu w rozpuszczalnikach organicznych.

Polimery z małym stopniem usieciowania, wykazują znaczną elastyczność, zwane są elastomerami (np. kauczuki wulkanizowane).

Polimery z dużym stopniem usieciowania, zwane duroplastami, które ulegają utwardzeniu, na skutek sieciowania, pod wpływem temperatury lub reakcji chemicznych (np. żywice epoksydowe, fenolowo-formaldehydowe). Duroplasty wykazują stabilność wymiarową, nie topią się i nie płyną, ponieważ łańcuchy utraciły ruchliwość wskutek sieciowania.

Charakterystyczne cechy wielu polimerów, to niska gęstość przy dość wysokiej wytrzymałości, tanie surowce oraz wyroby gotowe, są łatwe formowaniu (można uzyskać elementy o skomplikowanych kształtach), dobra odporność chemiczna, dobre właściwości termoizolacyjne i elektroizolacyjne, słabo odbijają światło, ograniczona możliwość poddawania obróbce cieplnej i plastycznej, stabilność wymiarów niska i średnia, są podatne na degradację pod wpływem promieniowania UV (obniżeniu mogą ulec wytrzymałości oraz pogorszeniu walory estetyczne), nie są przydatne do pracy w podwyższonej temperaturze (powyżej 200 °C mięknią lub ulegają rozkładowi chemicznemu).

Obecnie polimery powszechnie wykorzystywane są w wielu dziedzinach, takich jak technika, medycyna oraz życiu codziennym.

14.2. Część praktyczna

Ćwiczenie polega na zapoznaniu się z właściwościami wybranych tworzyw sztucznych na podstawie statycznej próby rozciągania.

14.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:

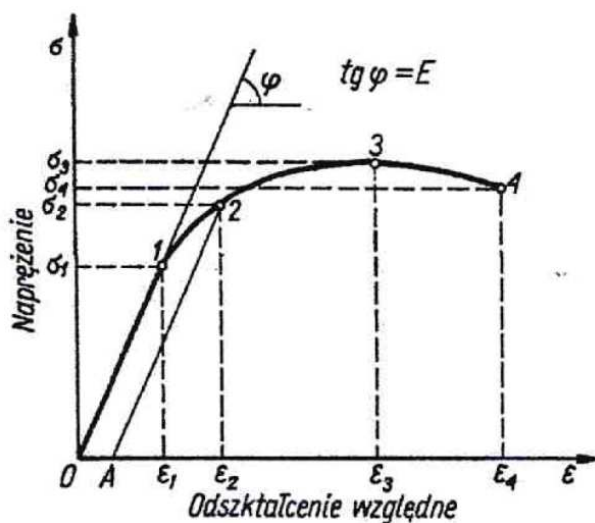
1. Rodzaje wiązań atomowych występujące w polimerach oraz ogólna charakterystyka właściwości polimerów.
2. Wyjaśnić proces polimeryzacji – zdefiniować pojęcia monomer i mer.
3. Zasadnicze różnice pomiędzy termoplastami i duroplastami.
4. Zmiany stanów fizycznych polimerów bezpostaciowych podczas ogrzewania i chłodzenia (zależność modułu sprężystości wzdłużnej od temperatury).
5. Budowa, właściwości oraz przykłady zastosowania wybranych termoplastów: polimetakrylan metylu (PMMA), poliwęglan (PC), akrylonitryl-butadien-styren (ABS).
6. Jakie właściwości materiałów możliwe do określenia na podstawie statycznej próby rozciągania.

14.2.2. Opis przebiegu ćwiczenia

Podstawową wielkością mierzoną przy próbie na rozciąganie jest odkształcenie (wydłużenie) oraz naprężenie (rysunek 14.2). Wydłużenie bezwzględne Δl_x , jest to różnica pomiędzy końcową a początkową długością odcinka pomiarowego próbki użytej do badań:

$$\Delta l_x = l_x - l_0 [m]$$

gdzie: l_0 – długość początkowa odcinka pomiarowego [m], l_x – końcowa długość odcinka pomiarowego [m].



Rys. 14.2. Wykres rozciągania, gdzie: σ_1 – granica proporcjonalności – materiał rozciągany zachowuje się zgodnie z prawem Hooke'a, σ_2 – umowna granica plastyczności, σ_3 – doraźna wytrzymałość na rozciąganie (to naprężenie maksymalne, jakie materiał jest w stanie przenieść podczas krótkotrwałego, statycznego rozciągania), σ_4 – naprężenie zrywające, przy którym występuje maksymalne wydłużenie względne widoczne podczas rozciągania [PN-EN ISO 6892-1:2020-05]

Wydłużenie względne określane jest zależnością:

$$\varepsilon_x = \Delta l_x / l_0 \quad (14.1)$$

lub

$$\varepsilon_x = (\Delta l_x / l_0) \times 100\% \quad (14.2)$$

Naprężenie σ , jest to stosunek siły, która powoduje odkształcenie do początkowej powierzchni poprzecznego przekroju próbki rozciąganej (przekrój prostopadły do osi rozciągania):

$$\sigma = P/A_0 \text{ [MPa]} \quad (14.3)$$

gdzie: P – siła powodująca odkształcenie [N], A_0 – powierzchnia przekroju początkowego próbki [m²].

Podstawową charakterystyką zachowania się tworzyw podczas ich rozciągania jest tzw. wykres rozciągania, który umożliwia prześledzenie współzależności pomiędzy dwiema podstawowymi zmiennymi próby rozciągania tj., pomiędzy odkształceniem i naprężeniem wg zależności:

$$\sigma = f(\varepsilon) \quad (14.4)$$

Schemat rozciągania pozwala prześledzić kolejne etapy rozciągania i charakterystyczne punkty. W rozciągającym tworzywie naprężenia wzrastają na początku proporcjonalnie do odkształcenia (wg prawa Hooke'a), co przedstawia prostoli-

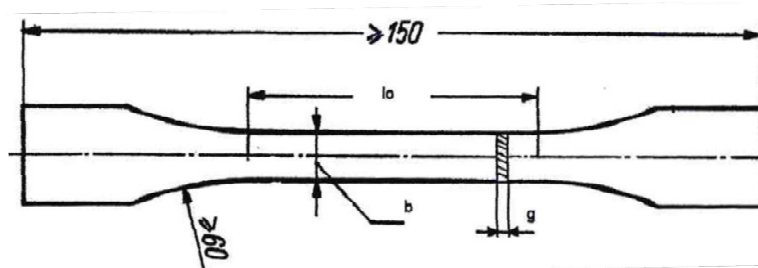
niowy odcinek 0-1 na rys. 14.2. W tym zakresie naprężenia opisywane są liniową funkcją odkształceń:

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (14.5)$$

Współczynnik kierunkowy tej prostej, to tangens kąta nachylenia do osi odciętych (ε) tego prostoliniowego odcinka – nazywany modułem sprężystości wzdłużnej E .

14.2.3. Przygotowanie próbek do badań oraz pomiar wytrzymałości i wydłużenia względnego

1. Nanieść na próbkę odcinek pomiarowy (l_0) zgodnie z rys. 14.3.



Rys. 14.3. Rysunek próbki do badania wytrzymałości, gdzie: g - grubość próbki na odcinku pomiarowym l_0 (zmierzona z dokładnością do 0,00001 m) [m], b - szerokość odcinka pomiarowego (zmierzona z dokładnością do 0,00001 m) [m]. [PN-EN ISO 6892-1:2020-05]

2. Na długości odcinka pomiarowego (l_0) próbki należy dokonać pomiaru, (w co najmniej trzech miejscach), a także obliczyć średnią wartość pola przekroju poprzecznego A_0 próbki, wg wzoru:

$$A_0 = g \times b \text{ [m}^2\text{]} \quad (14.6)$$

3. Wymiary próbek i wyznaczone właściwości wpisać w tabelach (tabela 14.1 i tabela 14.2).

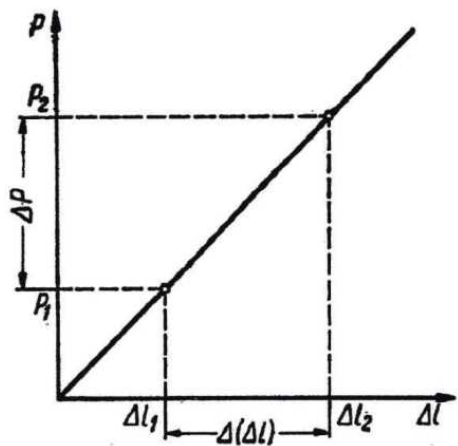
4. Wyznaczanie modułu sprężystości wzdłużnej E z zależności:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (14.7)$$

W praktyce wzór ten przybiera następującą postać:

$$E = (\Delta P \times l_0) / [A_0 \times \Delta(\Delta l)] \quad (14.8)$$

gdzie: E – moduł sprężystości wzdłużnej Young'a [MPa], ΔP – przyrost obciążenia [N] (rys. 14.4), $\Delta(\Delta l)$ – przyrost odkształcenia bezwzględnego [m], l_0 – początkowa długość odcinka pomiarowego [m], A_0 – początkowy przekrój poprzeczny odcinka pomiarowego [m²].



Rys. 14.4. Prostoliniowy fragment wykresu rozciągania w początkowej jego fazie [PN-EN ISO 6892-1:2020-05]

Tabela 14.1. Wyniki pomiarów – dane wyjściowe

Oznaczenie próbki	g [m] ×10 ⁻³	b [m] ×10 ⁻³	l ₀ [m] ×10 ⁻³	A ₀ [m ²] ×10 ⁻⁶ (wartość śr.)	l ₀ [m] ×10 ⁻³ (wartość śr.)

Tabela 14.2. Zestawienie wyników badań

Oznaczenie próbki	Indeks (i)	P _i [N]	l _i [m] ×10 ⁻³	ε _i [%]	σ _i [MPa]	E [MPa] (wartość średnia)

Moduł Younga można rozpatrywać jako tangens kąta φ ($E = \operatorname{tg} \varphi$), pod którym jest nachylony prostoliniowy odcinek wykresu rozciągania względem

osi odkształceń (rysunek 14.2 i 14.4). Jest to współczynnik kierunkowy odpowiedniego równania prostej i może być traktowany jako miara oporu, jaki stawia tworzywo poddane jednoosiowemu rozciąganiu.

14.2.4. Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia oraz krótką charakterystykę badanych tworzyw i przykłady ich zastosowania.
2. Zestawienie wyników badań w tabelach (na podstawie instrukcji) oraz rysunek próbki wraz z naniesionym odcinkiem pomiarowym.
3. Wykresy odkształcenie – naprężenie dla badanych próbek tworzyw.
4. Dyskusja wyników – porównanie wytrzymałości badanych tworzyw, obserwacja przełomów oraz wnioski.

15. Badanie właściwości mechanicznych tworzyw ceramicznych

15.1. Wprowadzenie

15.1.1. Właściwości mechaniczne materiałów inżynierskich

Podczas pracy elementy narażone są na działanie różnego rodzaju sił o charakterze statycznym lub dynamicznym w warunkach normalnych, niskiej lub wysokiej temperaturze. Właściwości mechaniczne materiału mają związek z tym jak reaguje na obciążanie lub odkształcanie. Z tego powodu materiały poddaje się badaniom, które mają na celu stwierdzić odporność materiału na działanie różnego rodzaju obciążeń.

Badania właściwości mechanicznych są prowadzone w celu określenia właściwości technologicznych, które decydują o przydatności materiałów do określonej techniki wytwarzania oraz do wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych, gdzie konieczna jest znajomość siły bądź momentu sił, jako jednej z wielkości, które mierzone są podczas badania. Z konstrukcyjnego punktu widzenia najważniejszymi są te właściwości mechaniczne, które stanowią podstawę obliczeń wytrzymałościowych elementów maszyn i konstrukcji. Właściwości wytrzymałościowe, charakteryzujące zdolność materiału do przenoszenia naprężeń, to granica sprężystości R_{sp} , granica plastyczności R_e , wytrzymałość na rozciąganie R_m , twardość H . Właściwości plastyczne, charakteryzujące podatność materiału do odkształceń to wydłużenie A , przewężenie Z oraz udarność U .

W zależności od charakteru obciążenia wyróżnia się wytrzymałość:

- statyczną – odporność na obciążenia statyczne,
- udarową – odporność na uderzenia,
- na pełzanie – odporność na długotrwałe obciążenie w podwyższonej temperaturze,
- zmęczeniową – odporność na cykliczne zmiany obciążenia.

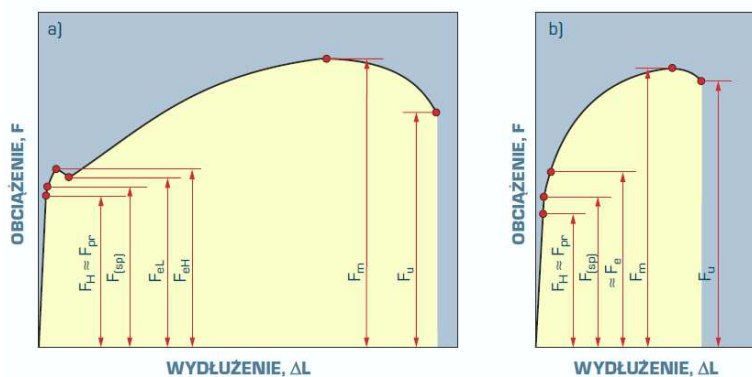
15.1.2. Wytrzymałość statyczna

Wytrzymałość statyczną materiałów ciągliwych (np. metali, tworzyw sztucznych) ocenia się najczęściej wytrzymałością na rozciąganie, a materiałów kruchych (np. ceramiki, szkła, żeliw) – wytrzymałością na ściskanie lub zginanie. Wytrzymałość, jako zdolność do przenoszenia naprężeń bez płynięcia lub naruszenia spójności materiału, zależy od rodzaju wiązania, typu struktury kry-

stalicznej, naprężeń własnych, mikrostruktury i stanu powierzchni oraz od temperatury.

Najwyższą wytrzymałość mają kryształy z wiązaniami kowalencyjnymi, jonowymi i metalicznymi, niższą – materiały z wiązaniami międzycząsteczkowymi siłami Van der Waasa. Wytrzymałość monokryształów jest tym większa, im mniej defektów występuje w ich strukturze. W porównaniu do monokryształów materiały polikrystaliczne charakteryzują się wyższą wytrzymałością, dzięki umacniającemu wpływowi granic ziaren. Wpływ ten jest tym większy, im bardziej drobnoziarnisty jest materiał i im niższa jest temperatura.

Wielkości charakteryzujące właściwości wytrzymałościowe i plastyczne materiałów można wyznaczyć i obliczyć w wyniku statycznej próby rozciągania (PN-EN 10002-1:2004). Niezbędne dane pomiarowe odczytuje się z wykresu zarejestrowanego podczas próby rozciągania (rys.1.5.1).



Rys.1.5.1. Wykresy rozciągania charakterystyczne dla metali a) z wyraźną i b) bez wyraźnej granicy plastyczności [Dobr-02]

Granica wytrzymałości na rozciąganie R_m – to naprężenie normalne, które wylicza się jako stosunek największej wartości siły rozciągającej F_m , którą uzyskano w trakcie próby, do pola powierzchni (S_0) początkowego przekroju próbki:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (15.1)$$

Wyrażna granica plastyczności R_e – to naprężenie, po osiągnięciu którego występuje wyraźny wzrost wydłużenia próbki przy stałej lub nieco niższej sile rozciągającej:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (15.2)$$

W normie PN-EN 10002-1:2004 podano sposób obliczenia górnej lub dolnej granicy plastyczności, które oznaczają się, jako R_{eH} lub R_{eL} . Przy braku wyraźnej granicy plastyczności wyznacza się umowną granicę plastyczności, tj. naprężenie, które powoduje w badanej próbce trwałe wydłużenie o wartości 0,2%:

$$R_{e0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \quad (15.3)$$

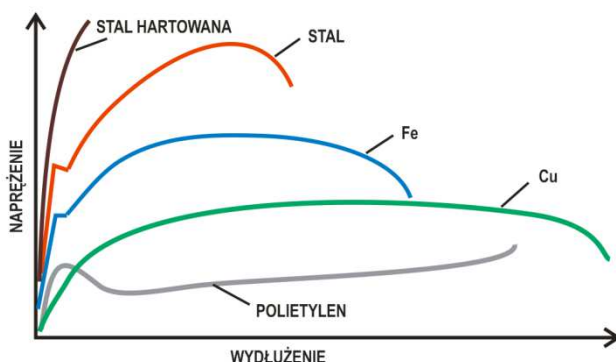
Wydłużenie A oblicza się, jako iloraz trwałego wydłużenia próbki ΔL po zerwaniu do długości początkowej L_0 , podawany w procentach:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (15.4)$$

Przewężenie Z oblicza się, jako iloraz pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki S_u w miejscu po zerwaniu do pola powierzchni przekroju początkowego S_0 , podawany w procentach:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (15.5)$$

Wytrzymałość materiałów związana jest z jego ciągliwością, co widać wyraźnie na wykresie naprężenie - wydłużenie dla różnych materiałów (rys. 1.5.2). Materiały ciągliwe (np. aluminium, miedź) odznaczają się stosunkowo niewielką wytrzymałością i dużym odkształceniem plastycznym przy słabo zaznaczonej granicy plastyczności. Stal miękka przy znacznej wytrzymałości i dużym odkształceniu plastycznym posiada wyraźną granicę plastyczności. Natomiast materiały kruche odznaczają się bardzo wysoką (stal zahartowana) lub niską (żeliwo) wytrzymałością na rozciąganie, przy bardzo małym odkształceniu plastycznym i niezaznaczonej granicy plastyczności.



Rys. 15.2. Krzywe rozciągania różnych materiałów

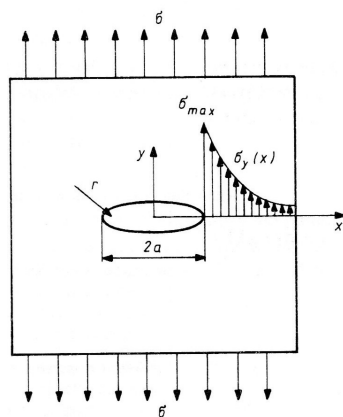
15.1.3. Właściwości mechaniczne materiałów ceramicznych

Materiał poddawany obciążeniu rozciągającemu podlega odkształceniu, przez co zwiększają się odstęp międzyatomowe. W materiale magazynowana jest energia sprężysta odpowiadająca pracy deformacji. Po pęknięciu (dekohezji elementu), atomy, które uprzednio znajdowały się wewnątrz struktury krystalicznej, położone są teraz na powierzchni obdarzonej dodatkową energią wyrażoną na jednostkę rozwinięcia powierzchni przez energię powierzchniową γ . Tuż przed pęknięciem, charakterystycznym dla tworzyw kruchych prawo Hoo-ka ma postać:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{a}} \quad (15.6)$$

gdzie: σ – naprężenie niszczące, γ – właściwa energia powierzchniowa, E – moduł Younga, a – odstęp między sąsiednimi powierzchniami atomowymi.

Wartości zbliżone do wartości teoretycznej uzyskuje się tylko w przypadku wiskerów, tj. włoskowatych monokryształów. Wytrzymałość mechaniczna polikrystalicznych włókien tych samych faz krystalicznych jest o jeden rząd, a litych polikryształów o dwa rzędy wielkości niższa od teoretycznej. Przyczyną odbiegania rzeczywistej wytrzymałości materiałów od wytrzymałości teoretycznej jest występowanie we wszystkich materiałach kruchych dużej liczby submikronowych pęknięć, w otoczeniu, których, w obciążonym materiale występuje koncentracja naprężeń. Ilustruje to rozkład naprężeń w dużej płycie zawierającej eliptyczną szczelinę o długości $2a$ (rys. 2.10.1).



Rys. 15.3. Naprężenia występujące w płycie z pęknięciem [Pamp-88]

Maksymalne naprężenie rozciągające w wierzchołku pęknięcia przedstawia wzór

$$\sigma_{\max} = P \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \right) \quad (15.7)$$

gdzie: r – promień krzywizny wierzchołka szczeliny, P – zewnętrzne obciążenie.

W tych i podobnych przypadkach można założyć, że $r \ll a$, a tym samym, że $a/r \gg 1$, dzięki temu powyższy wzór można uprościć do postaci:

$$\sigma_{\max} = 2P\sqrt{\frac{a}{r}} \quad (15.8)$$

Mnożąc obie strony przez czynnik $\sqrt{\pi r}$ otrzymujemy:

$$\frac{1}{2}\sigma_{\max}\sqrt{\pi r} = P\sqrt{\pi a} \quad (15.9)$$

Prawa strona równania definiowana jest, jako współczynnik intensywności naprężeń. Współczynnik K zdefiniowany jest więc przy pomocy mierzalnych wielkości i odgrywa główną rolę w określeniu odporności materiału na kruche pękanie. Gdy jego wartość przekroczy określoną wartość graniczną K_C , wówczas można oczekiwać zapoczątkowanie samorzutnego rozprzestrzeniania się szczeliny w materiale przez przyrost jej długości o Δa . Przy zadanej wartości r_k szczelina może zacząć się rozprzestrzeniać, gdy $\sigma_{\max}$ osiągnie wartość wytrzymałości teoretycznej σ_t . Inaczej mówiąc K_I osiąga wartość krytyczną K_{IC} gdy

$$\frac{1}{2}\sigma_k\sqrt{\pi r_k} = P_{kr}\sqrt{\pi a_c} = K_{IC} \quad (15.10)$$

gdzie: P_{kr} – krytyczne obciążenie zewnętrzne, a_c – krytyczna długość szczeliny, przy której zapoczątkowany jest proces rozprzestrzeniania, K_{IC} – nosi nazwę współczynnika odporności na kruche pękanie.

Wartości współczynnika K_{IC} dla różnych grup materiałów podano w tabeli 15.1.

O wytrzymałości doraźnej (rzeczywistej) materiału decyduje wielkość defektu najbardziej niebezpiecznego dla danej struktury. Charakter rozkładu defektów, gęstość i orientacja warunkuje rozrzut wyników wytrzymałości próbki. Z warunku tego wynika duże zróżnicowanie wytrzymałości przy różnych sposobach przyłożenia obciążenia, oraz zależność wytrzymałości od objętości próbki, ponieważ wytrzymałość danej próbki materiału ceramicznego charakteryzuje tylko tę próbkę, nie zaś średnie właściwości całej partii materiału. Zależność wytrzymałości od pojawienia się krytycznej wady wymaga, więc staty-

stycznego podejścia do wytrzymałości materiałów kruchych. Statystyczna analiza opiera się na teorii Weibulla, w której przyjęto następujące założenia:

- materiał jest izotropowy, a rozkład wielkości defektów w materiale jest statystyczny,
- prawdopodobieństwo znalezienia się defektu o wielkości krytycznej w danej jednostkowej objętości dla całego materiału jest identyczne,
- dekohezja materiału przez kruche zniszczenie następuje wskutek rozprzestrzeniania się defektu o wielkości krytycznej,
- liczba defektów w materiale jest duża.

Tabela 15.1. Klasyfikacja materiałów wg odporności na kruche pękanie [Pamp-88]

Zakresy K_{IC} [MNm ^{-3/2}]	Rodzaje materiałów
< 1,0	- większość materiałów monokrystalicznych, - wszystkie rodzaje szkła, - niektóre połączenia szkło – ceramika, szczególnie te o bardzo drobnym uziarnieniu lub o wysokiej zawartości szkła.
1,2 ÷ 2,5	- większość połączeń szkło – ceramika, - większość porcelan i innych materiałów ilastych, - niektóre rodzaje ceramiki korundowej, szczególnie te o bardzo drobnym uziarnieniu, kwasoodporne, - niektóre rodzaje ceramiki tlenkowej, np. MgO.
2,5 ÷ 5,0	- większość rodzajów ceramiki korundowej, - gęsta ceramika nietlenkowa: B₄C, SiC, Si₃N₄, - reaktywnie spiekany azotek tlenu, - wiele rodzajów ceramiki porowatej.
5,0 ÷ 15	Wzmocniona przemianami fazowymi ceramika oparta na korundzie lub ZrO ₂ , stopy metali ciężkich o małej zawartości spoiwa.
> 15	- stopy metali ciężkich o dużej zawartości spoiwa, - niektóre rodzaje ceramiki wzmocnionej włóknami, - węgiel wzmocniony włóknami węglowymi.

W materiale o jednostkowej objętości V , poddanym działaniu obciążenia rozciągającego P , wywołującego w materiale jednorodne naprężenie σ_z , prawdopodobieństwo wystąpienia kruchego zniszczenia P_f przy danym obciążeniu P dane jest wyrażeniem:

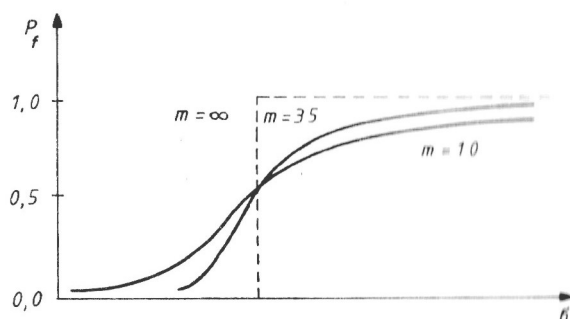
$$P_f = 1 - \exp \left[-V \left(\frac{\sigma_z \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right], \sigma_z > \sigma_u \text{ i } P_f = 0 \quad (15.11)$$

gdzie: σ_u – jest naprężeniem, przy którym prawdopodobieństwo to jest równe zero, σ_0 – współczynnik normalizujący.

Współczynnik m (moduł Weibulla) wiąże się z prawdopodobieństwem występowania krytycznego defektu. Im większa jest wartość m , tym węższy jest przedział wielkości defektów krytycznych. Miarą prawdopodobieństwa zniszczenia przy rozciąganiu dla różnych wartości parametru m pokazano na rysunku 15.4, a przykładowe wartości modułu Weibulla m dla metali i ceramiki przedstawiono w tabeli 15.2.

Tabela 15.2. Wartości parametru Weibulla m dla wybranych materiałów [Pamp-05]

Rodzaj materiału	Wartość parametru Weibulla m
Aluminium	20
Stal	30
Porcelana elektrochemiczna	$5 \div 10$
Ceramika korundowa:	
99% Al_2O_3	30
97% Al_2O_3	$15 \div 20$
90% Al_2O_3	10
Steatyt	$8 \div 9$

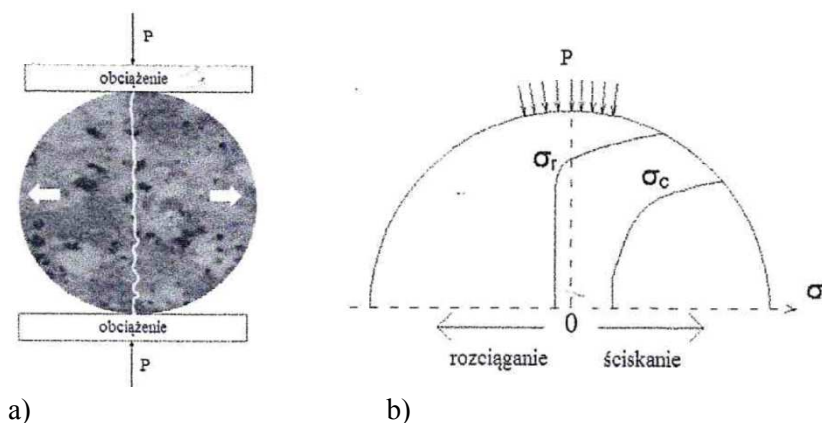


Rys. 15.4. Prawdopodobieństwo kruchego zniszczenia P_f przy wytrzymałości na rozciąganie dla różnych wartości modułu Weibulla m [Pamp-05]

Coraz częściej do określania wytrzymałości na rozciąganie poprzez ściskanie próbek o kształcie cylindrycznym stosowana jest metoda brazylijska – rys. 15.5 [Prov-06]. Gdy próbka jest ściskana w kierunku średnicy, naprężenie rozciągające (σ_r) jest indukowane w kierunku normalnym do średnicy i jest ono stałe w obszarze wokół środka. Naprężenie takie oblicza się z zależności:

$$\sigma_r = 2 \times F_b / (\pi \times d_s \times t_s) \text{ [MPa]} \quad (15.12)$$

gdzie: σ_r – naprężenie rozciągające [MPa], F_b – siła rozrywająca [N], d_s – średnica próbki [mm], t_s – grubość próbki [mm].



Rys. 15.5. Metoda brazylijska, a) schemat obciążenia próbki w postaci walca, b) rozkład naprężeń w próbce [Prov-06]

15.2. Część praktyczna

Ćwiczenie polega na zapoznaniu się z właściwościami ceramiki na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie poprzez ściskanie próbek ze spiekanych tworzyw ceramicznych o kształcie cylindrycznym.

15.2.1. Do ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:

1. Wymienić wiązania pierwotne i wtórne oraz wyjaśnić na czym polegają. Rodzaje wiązań występujących w materiałach ceramicznych.
2. Na podstawie funkcji energii potencjalnej od odległości między atomami określić siłę równowagową oddziaływania między atomami.
3. Na podstawie zależności wydłużenie = $f(\text{obciążenie})$ przedstawić właściwości materiałów kruchych, sprężystych i plastycznych; prawo Hooke'a dla tych materiałów.
4. Na czym polega kruche pękanie materiałów ceramicznych, kiedy i jak przebiega pękanie niestabilne i stabilne?
5. Na czym polega próba badania materiałów ceramicznych na zginanie.

15.2.2. Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia oraz krótką charakterystykę materiałów ceramicznych.
2. Metodykę badań (opis próbek oraz maszyny wytrzymałościowej).
3. Tabelaryczne (tabela 15.1) zestawienie wyników badań oraz obliczenia wartości naprężeń niszczących.

Tabela 15.1. Zestawienie wyników badań

Oznaczenie próbki	Wymiar d [mm]	Wymiar t [mm]	Siła niszcząca F [N]	Naprężenie niszczące σ_r [MPa]	Dokładność pomiaru	
					ΔF	Δl

4. Wykresy siła – odkształcenie dla badanych próbek.
5. Dyskusja wyników – porównanie wytrzymałości oraz charakterystyka przełomów badanych tworzyw oraz wnioski.

Bibliografia

- [Ashb-95] Ashby M.F., Jones D.R.H.: Materiały inżynierskie – tom 1. WNT, Warszawa, 1995.
- [Ashb-98] Ashby M.F., Jones D.R.H.: Materiały inżynierskie – tom 2. WNT, Warszawa, 1998.
- [Blic-17] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa. WNT, Warszawa, 2017.
- [Blic-17-1] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa: stal. PWN, Warszawa, 2017.
- [Dobr-02] Dobrzański L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. WNT, Gliwice - Warszawa, 2002.
- [Dobr-14] Dobrzański L.A. (red.): Leksykon materiałoznawstwa. Metale. Polimery. Ceramika. Kompozyty. Wyd. 2, tom I-VI (+CD). Wyd. Verlag Dashöfer, Warszawa, 2004-2014.
- [Gula-88] Gulajew A.P.: Metaloznawstwo, Wyd. Śląsk, Katowice, 1988.
- [Huci-95] Hucińska J.: Metaloznawstwo. Materiały do ćwiczeń laboratoryjnych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1995.
- [Luty-77] Luty W. (red.): Poradnik inżyniera – obróbka cieplna stopów żelaza, WNT, Warszawa, 1977.
- [Oczo-96] Oczko K.: Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych, Oficyna Wydawnicza Pol. Rzesz., 1996.
- [Pamp-05] Pampuch R.: Współczesne materiały ceramiczne, Uczeln. Wyd. Naukowo Dydaktyczne AGH, Kraków, 2005.
- [Pamp-88] Pampuch R.: Podstawy inżynierii materiałów ceramicznych, PWN Warszawa, 1988.
- [Prow-94] Prowans St.: Materiałoznawstwo, PWN-T, Warszawa, 1994
- [Prow-00] Prowans St.: Struktura stopów, PWN, Warszawa, 2000.
- [Prov-06] Proveti J.R.C., Michot G. The Brazilian test: a tool for measuring the toughness of a material and its brittle to ductile transition. Int J Fract 139 (2006) 455–460.
- [Przy-07] Przybyłowicz K.: Metaloznawstwo. WNT, Warszawa, 2007.
- [Marc-13] Marciniak J.: Biomateriały, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
- [Rabe-13] Rabek Jan F.: Polimery. Otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie. PWN, Warszawa, 2013.
- [Rudn-98] Rudnik St.: Metaloznawstwo. PWN, Warszawa, 1998.

- [Skrz-19] Skrzypek S.J., Przybyłowicz K.: Inżynieria metali i technologie materiałowe, PWN Warszawa 2019.
- [Stau-79] Staub F., Adamczyk A., Cieślak Ł., Gubała J., Maciejny A.: Metaloznawstwo. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1979.
- [Świe-09] Świczko-Żurek B.: Biomateriały, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2009.
- [Tybu-02] Tybulczuk J., Martynowicz-Lis K.: Produkcja odlewów na świecie. Biuletyn Instytutu Odlewnictwa, Kraków, 3 (2002) 25-28.
- [Wend-76] Wendorff Z.: Metaloznawstwo, WNT, Warszawa, 1976.
- [Weso-81] Wesołowski K.: Metaloznawstwo i obróbka cieplna, WNT, W-wa, 1980.

Wykaz norm

- PN-H-01200:1993 – Obróbka cieplna metali i stopów. Terminologia
- PN-H-04357:1993 – Stal i staliwo. Tablice porównawcze twardości określonej sposobem Rockwella, Vickersa, Brinella, Shore'a i wytrzymałości na rozciąganie.
- PN-H-04503:1961 – Odczynniki do badania mikrostruktury stopów żelaza.
- PN-H-04512:1975 – Metale nieżelazne. Odczynniki do ujawniania mikrostruktury.
- PN-H-04514:1987 – Stal, staliwo i żeliwo. Badanie makrostruktury. Próba Baumanna.
- PN-H-83117:1979 – Żeliwo niskostopowe. Odlewy ogólne. Wymagania i badania.
- PN-H-83144:1988 – Żeliwo stopowe. Gatunki.
- PN-H-83160:1988 – Staliwo odporne na ścieranie. Gatunki.
- PN-H-83161:1990 – Staliwo narzędziowe. Gatunki.
- PN-H-84032:1974 - Stal sprężynowa (resorowa). Gatunki
- PN-H-87025:1992 – Stopy miedzi do przeróbki plastycznej. Stopy miedzi z cynkiem. Gatunki
- PN-H-87050:1992 – Stopy miedzi do przeróbki plastycznej. Stopy miedzi z cyną. Gatunki
- PN-H-87052:1992 – Stopy miedzi do przeróbki plastycznej. Stopy miedzi z niklem. Gatunki
- PN-B-13151:1982 – Szkło. Metody badań. Pomiar wytrzymałości na zginanie.

PN-CR 12361:2002 – Badania niszczące spoin materiałów metalowych. Odczynniki do badań makroskopowych i mikroskopowych.

PN-EN 515:2017-05 – Aluminium i stopy aluminium. Wyroby przerobione plastycznie. Oznaczenia stanów.

PN-EN 573-3:2004 – Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 3: Skład chemiczny.

PN-EN 1412:2016-12 – Miedź i stopy miedzi. Europejski system numeryczny.

PN-EN 1561:2012 – Odlewnictwo. Żeliwo szare.

PN-EN 1563:2012 – Odlewnictwo. Żeliwo sferoidalne.

PN-EN 1562:2019-04 – Odlewnictwo. Żeliwo ciągliwe.

PN-EN 1652:1999 – Miedź i stopy miedzi. Płyty, blachy, taśmy i krążki ogólnego przeznaczenia.

PN-EN 1706:2010 – Aluminium i stopy aluminium. Odlewy. Skład chemiczny i własności mechaniczne.

PN-EN 1780-1:2003 – Aluminium i stopy aluminium. Oznaczenia gąsek do przetopienia z aluminium stopowego, stopów wstępnych i odlewów. Część 1: System oznaczeń numerycznych.

PN-EN 1780-2:2003 – Aluminium i stopy aluminium. Oznaczenia gąsek do przetopienia z aluminium stopowego, stopów wstępnych i odlewów. Część 2: System oznaczeń na podstawie symboli chemicznych.

PN-EN 1982:2017-10 – Miedź i stopy miedzi. Gąski i odlewy

PN-EN 10002-1:2004 – Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia.

PN-EN 10020:2003 – Definicja i klasyfikacja gatunków stali.

PN-EN 10025-1:2007 – Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.

PN-EN 10027-1:2016-12 – Systemy oznaczania stali. Część 1: Znaki stali.

PN-EN 10027-2:2015-07 – Systemy oznaczania stali. Część 2: System cyfrowy.

PN-EN 10083-1:2008 – Stale do ulepszania cieplnego. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.

PN-EN 10084:2008 – Stale do nawęglania. Warunki techniczne dostawy.

PN-EN 10085:2003 – Stale do azotowania. Warunki techniczne dostawy.

PN-EN 10088-1:2014-12 – Stale odporne na korozję. Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję.

PN-EN 10088-2:2014-12 – Stale odporne na korozję. Część 2: Warunki techniczne dostawy blach cienkich/grubych i taśm ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia.

PN-EN 10090:2001 – Stale i stopy zaworowe stosowane w silnikach spalinyowych.

PN-EN 10095:2002 – Stale i stopy niklu żaroodporne.

PN-EN 10213:2008 – Odlewy staliwne do pracy pod ciśnieniem.

PN-EN 10283:2019-11 – Odlewy ze staliwa odpornego na korozję.

PN-EN 10302:2009 – Stale, stopy niklu i kobaltu żarowytrzymałe.

PN-EN 10340:2007 – Odlewy staliwne do zastosowań konstrukcyjnych.

PN-EN ISO 683-2:2018-08 – Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe. Część 2: Stale stopowe do hartowania i odpuszczania.

PN-EN ISO 3755:1994 – Staliwo węglowe konstrukcyjne ogólnego przeznaczenia.

PN-ISO 4381:1997 – Odlewnicze stopy ołowiu i cyny na łożyska ślizgowe wielowarstwowe.

PN-EN ISO 4957:2018-09 – Stale narzędziowe

PN-EN ISO 5817:2014-05 – Spawanie - Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek) - Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.

PN-EN ISO 6506-1:2014-12 – Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 1: Metoda badania.

PN-EN ISO 6507-1:2018-05 – Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badania.

PN-EN ISO 6892-1:2020-05 – Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.

ISO 4964:1984 – Steel. Hardness conversions.

ISO 11973:1999 – Heat-resistant cast steels and alloys for general applications.

ISO 1190-1:1982 – Copper and copper alloys. Code of designation. Part 1: Designation of materials.

Załączniki

Instrukcja dotycząca zasad BHP podczas zajęć laboratoryjnych

Podczas zajęć, w każdym pomieszczeniu laboratorium obowiązują ogólne oraz szczegółowe przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy.

Z przepisów ogólnych na szczególną uwagę zasługują następujące zasady:

1. Należy znać ogólne przepisy BHP i stosować się do nich, zwrócić uwagę na bezpieczeństwo pozostałych osób znajdujących się w laboratorium. Niewłaściwe zachowywanie się podczas ćwiczeń laboratoryjnych może być podstawą do usunięcia studenta z zajęć.
2. Wszelkie prace laboratoryjne należy wykonywać w odpowiednim ubraniu ochronnym (fartuch) i przy użyciu wymaganego sprzętu ochronnego (okulary, rękawice).
3. Podczas wykonywania ćwiczeń należy przebywać w bezpiecznej odległości od urządzeń laboratoryjnych, zgodnie z poleceniami prowadzącego.
4. Przed wykonywaniem czynności laboratoryjnych należy zapoznać się z przebiegiem ćwiczenia, zasadami obsługi przyrządów i urządzeń.
5. Czynności laboratoryjne należy wykonywać uważnie, stosując się do poleceń prowadzącego i pracowników obsługi technicznej.
6. Nie wolno posługiwać się uszkodzonym sprzętem laboratoryjnym, a wszelkie uszkodzenia aparatury należy niezwłocznie zgłaszać prowadzącemu.
7. Bez wyraźnego polecenia prowadzącego nie wolno uruchamiać ani zatrzymywać urządzeń laboratoryjnych.
8. Bez wyraźnego polecenia prowadzącego nie wolno pozostawiać włączonych urządzeń laboratoryjnych bez nadzoru.
9. W razie wypadku należy zachować spokój i udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym, niezwłocznie powiadomić prowadzącego.

OŚWIADCZENIE

Powyższe zasady są mi znane i zobowiązuję się do ich przestrzegania.

Rok studiów: sem.: kierunek:

rok akademicki: / Data:

L.p.	Imię i nazwisko	Podpis
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

Wzór tabeli do sprawozdania z zajęć laboratoryjnych

4

Politechnika Koszalińska	<i>Laboratorium inżynierii materiałowej</i>		
Rok akademicki:/..... Ćwiczenie nr	Temat ćwiczenia:		
Wydział: Kierunek: Grupa:	Nazwisko i imię:		
Data wykonania ćwiczenia	Ocena	Data zaliczenia	Podpis prowadzącego

Wstęp teoretyczny (max 1-2 strony)



Fundusze Europejskie
Wiedza Edukacja Rozwój



**Rzeczpospolita
Polska**

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



Projekt „Dostępna uczelnia - Politechnika Koszalińska”

Numer projektu POWR.03.05.00-00-A018/20

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014-2020