

7. STALE NIESTOPOWE, SURÓWKI I ŻELIWA

Opracował: dr inż. Andrzej Kasprzyk

7.1. Układ równowagi żelazo-węgiel (Fe-Fe₃C)

7.1.1. Uwagi wstępne

Układ żelazo-węgiel jest wzorcowym układem odniesienia, w oparciu o który analizuje się przemiany fazowe i mikrostrukturę stopów żelaza z węglem w stanie równowagi. Odstępstwa od układu wzorcowego wynikają z dwóch przyczyn:

- 1) szybkości nagrzewania i chłodzenia analizowanych stopów są w rzeczywistości większe, niż stosowane przy konstruowaniu wykresu, kiedy to mówimy o „nieskończenie wolnym chłodzeniu (nagrzewaniu)”,
- 2) układ żelazo-węgiel zawiera tylko dwa składniki: Fe i C, podczas gdy stale i żeliwa są stopami zawierającymi również inne pierwiastki.

Układ równowagi żelazo-węgiel został dokładnie opracowany tylko do zawartości 6,67% masowych C. Przy tej zawartości węgla tworzy się węglik żelaza o wzorze Fe₃C zwany cementytem. Omawiany poniżej układ Fe-Fe₃C jest zatem tylko fragmentem układu żelazo-węgiel.

Układ Fe-Fe₃C jest układem metastabilnym, bowiem węglik żelaza poddany wygrzewaniu przy temperaturze ok. 1000°C ulega rozpadowi na żelazo i grafit; układ żelazo-grafit jest układem stabilnym. Na **rys. 7.1** zamieszczono wykres Fe-Fe₃C z opisem fazowym, a na **rys. 7.2** z opisem składnikami strukturalnymi. Poszczególne punkty na wykresie Fe-Fe₃C mają swoje międzynarodowe oznaczenia. Współrzędne tych punktów (%C, °C) podano w tabeli na rys. 7.1. Linie likwidus wyznaczają punkty ABCD, linię solidus – punkty AHJECFD.

Krystalizacja zachodząca między liniami likwidus i solidus nosi nazwę krystalizacji pierwotnej. Poniżej linii solidus zachodzą przemiany fazowe w stanie stałym (tzw. krystalizacja wtórna). W układzie na rys. 7.2 występują następujące fazy:

- L - faza ciekła; powyżej linii likwidus,
- Fe₃C - cementyt; dla zawartości węgla 6,67%C, poniżej punktu D,
- α - ferryt (roztwór stały węgla w Fe_α) oraz ferryt wysokotemperaturowy oznaczany dawniej literą δ,
- γ - austenit (roztwór stały węgla w Fe_γ).

Poziome odcinki HJB, ECF i PSK odpowiadają trzem podstawowym przemianom zachodzącym przy stałych temperaturach (indeksy przy literach oznaczają skład chemiczny danej fazy):

- | | | |
|-------------------|---|----------|
| 1. perytektyczna: | $L_B + \alpha_H \Leftrightarrow \gamma_J$ | (1495°C) |
| 2. eutektyczna: | $L_C \Leftrightarrow \gamma_E + Fe_3C$ | (1148°C) |
| 3. eutektoidalna: | $\gamma_S \Leftrightarrow \alpha_P + Fe_3C$ | (727°C) |

- ad. 1. Przemiana ta zachodzi tylko w stopach zawierających od 0,09% do 0,53%C.
- ad. 2. W wyniku tej przemiany otrzymujemy przy chłodzeniu eutektykę zwaną ledeburytem. Przemiana ta zachodzi we wszystkich stopach zawierających powyżej 2,11%C.
- ad. 3. Produktem tej przemiany przy chłodzeniu jest eutektoid, który nazywamy perlitom. Przemiana ma miejsce we wszystkich stopach zawierających powyżej 0,0218%C.

Temperatury przemian fazowych ustala się na podstawie bardzo wolnego nagrzewania, a następnie bardzo wolnego chłodzenia danego stopu. Na tej podstawie wyznaczono równowagowe temperatury przemian fazowych, które oznacza się literą A (od francuskiego arrêt

– przystanek) z indeksem e (franc. *équilibre* – równowaga). Stąd np. równowagową temperaturę przemiany eutektoidalnej oznacza się jako A_{e1} . Niemniej w praktyce – dla uproszczenia oznaczeń – opuszcza się indeks „e” pozostawiając oznaczenie A_1 .

Poniżej zestawiono oznaczenia stosowane przy omawianiu układu Fe-Fe₃C.

- A_0 - temperatura przemiany magnetycznej cementytu (230°C).
- A_1 - temperatura przemiany eutektoidalnej (727°C).
- A_2 - temperatura przemiany magnetycznej ferrytu; do punktu O (0,45%C) temperatura ta wynosi 770°C, a przy większych zawartościach węgla zmienia się tak, jak zakres istnienia ferrytu w stalach, tzn. od punktu O do S i dalej do punktu K.
- A_3 - zakres temperatur na linii GS; początek wydzielania ferrytu przedeutektoidalnego przy chłodzeniu z austenitu w stalach podeutektoidalnych. Punkt G (912°C) jest temperaturą przemiany alotropowej żelaza.
- A_4 - zakres temperatur na linii NJ; koniec istnienia ferrytu wysokotemperaturowego przy chłodzeniu. Punkt N (1394°C) jest temperaturą przemiany alotropowej żelaza.
- A_{cm} - zakres temperatur na linii SE; początek wydzielania się cementytu drugorzędowego z austenitu podczas chłodzenia stali nadeutektoidalnych.

Przy omawianiu obróbki cieplnej stali wprowadza się rozróżnienie na przemiany przy nagrzewaniu (franc. *chauffage* – indeks c) oraz przy chłodzeniu (franc. *refroidissement* – indeks r) Na przykład A_{c1} oznacza temperaturę przemiany eutektoidalnej podczas nagrzewania stali, a A_{r1} oznacza temperaturę tej przemiany przy chłodzeniu stopu.

Bardziej precyzyjne oznaczenia dotyczą rozpoczęcia (ang. start, indeks s) oraz zakończenia (ang. finish, indeks f) przemiany eutektoidalnej w warunkach braku równowagi. A_{r1s} oznacza temperaturę początku przemiany eutektoidalnej przy chłodzeniu stali, a A_{r1f} – temperaturę końca przemiany eutektoidalnej przy jej chłodzeniu. Dotychczas w języku polskim stosowano oznaczenia odpowiednio: A_{r1p} i A_{r1k} .

W związku ze stosowaniem coraz czystszych materiałów i coraz dokładniejszych metod badawczych, poszczególne współrzędne punktów zestawionych w tabeli na rys. 7.1 ulegały na przestrzeni czasu nieznacznym zmianom. Stąd w różnych podręcznikach mogą się one nieco różnić od siebie.

7.1.2. Krzywe chłodzenia

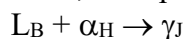
7.1.2.1. Czyste żelazo

Krzywą chłodzenia czystego żelaza od temperatury istnienia cieczy do temperatury pokojowej przedstawiono przy okazji omawiania reguły faz (p. 6.1.2). Jak z niej wynika, krzepnięcie żelaza następuje przy stałej temperaturze 1538°C. Przy tej temperaturze cała ciecz zamienia się w kryształy Fe_α o strukturze regularnej przestrzennie centrowanej. W zakresie temperatur 1538°C-1394°C następuje stygnięcie wydzielonych kryształów Fe_α .

Przy stałej temperaturze $A_4 = 1394^\circ\text{C}$ następuje przemiana alotropowa żelaza. Polega ona na przemianie odmiany Fe_α w odmianę Fe_γ , czyli na zmianie (przebudowie) struktury regularnej przestrzennie centrowanej (RPC) w strukturę regularną ściennie centrowaną (RCS). Żelazo o strukturze RCS istnieje do temperatury $A_3 = 912^\circ\text{C}$, przy której następuje kolejna przemiana żelaza w stan stały: żelazo o strukturze RCS przemienia się w żelazo o strukturze RPC. Tę ostatnią odmianę alotropową żelaza również oznaczamy jako Fe. Odbywa się to przy stałej temperaturze, co uwidacznia się na krzywej stygnięcia jako kolejny (trzeci) przystanek. Poniżej temperatury 912°C odbywa się stygnięcie Fe_α do temperatury otoczenia, przy czym przy temperaturze $T_{\text{Curie}} = 770^\circ\text{C}$ żelazo ze stanu paramagnetycznego przechodzi w stan ferromagnetyczny. Temperatura ta nosi nazwę temperatury Curie.

7.1.2.2. Stop I (0,3%C, stal podeutektoidalna)

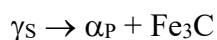
Krzepnięcie stopu rozpoczyna się przy temperaturze punktu 1 (rys. 7.1) od wydzielania się z cieczy kryształów fazy stałej, którą jest ferryt α wysokotemperaturowy. W trakcie krzepnięcia skład cieczy zmienia się wzdłuż linii AB od punktu 1 do B a skład fazy stałej wzdłuż linii AH od punktu 1' do H (rys. 7.3). Gdy stop ostygnie do temperatury punktu 2 (1495°C) zaczyna się przemiana perytektyczna w wyniku której z cieczy o składzie punktu B, oraz ferrytu o składzie punktu H powstaje austenit o składzie punktu J, co zapisujemy:



Przemiana ta zachodzi przy stałej temperaturze, tzn. odcinek 2-2' na krzywej stygnięcia jest poziomy.

Po zejściu przemiany perytektycznej – w zakresie temperatur od punktu 2 do punktu 3 (rys. 7.1) – z cieczy wydziela się austenit. Osiągnięcie temperatury punktu 3 na linii solidus kończy krzepnięcie stopu I. Poniżej tej temperatury istnieje tylko jedna faza – austenit, który stygnie aż do osiągnięcia przez stop temperatury punktu 4 na linii GS. Zaczyna się wówczas kolejna przemiana fazowa – tym razem w stanie stałym. Polega ona na wydzielaniu się z austenitu o składzie danym rzutem punktu 4 na oś stężeń - nowej fazy, którą jest ferryt o składzie punktu 4'. Ma ona miejsce cały czas podczas obniżania się temperatury od punktu 4 do punktu 5. W tym zakresie temperatur ubywa austenitu, zaś rośnie ilość wydzielanego ferrytu. Wydzielanie się ferrytu – a więc fazy o małej zawartości węgla – powoduje wzbogacanie się w węgiel pozostającego austenitu.

Po dojściu temperatury stopu do punktu 5 skład austenitu osiąga punkt S i zaczyna się przemiana eutektoidalna, polegająca na rozpadzie austenitu na dwie odrębne fazy o zróżnicowanej zawartości węgla; jedną z nich jest ferryt (0,0218% C), drugą cementyt (6,67%C) – por. **rys. 7.4**. Mieszanina tych faz nosi nazwę perlitu, a samą przemianę zapisujemy następująco:



Przemiana ta w warunkach równowagowych zachodzi przy stałej temperaturze, bowiem współistnieją wówczas trzy fazy, zatem $s = n - f + 1 = 2 - 3 + 1 = 0$ i na krzywej stygnięcia jest przystanek.

Po zakończeniu przemiany eutektoidalnej stop I stygnie do temperatury pokojowej, przy czym z ferrytu przedeutektoidalnego wydziela się - wzdłuż linii PQ – cementyt trzeciorzędowy (Fe_3C'''). Jednakże, niewielka ilość Fe_3C''' (ok. 0,2%), jak i obecność perlitu zawierającego cementyt sprawiają, że jest on w mikrostrukturze trudny do zidentyfikowania.

W podsumowaniu można stwierdzić, że mikrostruktura stopu I (stali 0,3%C) składa się praktycznie biorąc z ferrytu i perlitu.

Cementyt trzeciorzędowy najłatwiej zaobserwować w stalach, w których nie ma perlitu, a więc w stalach o zawartości węgla do 0,0218%C (np. w tzw. żelazie „armco”). Widoczny jest wtedy najczęściej w postaci wydzielen wzdłuż granic ferrytu. Natomiast w stalach średnio i wysokowęglowych, a tym bardziej w żeliwach białych, jest on praktycznie niemożliwy do zidentyfikowania. Dlatego przy opisie układu Fe- Fe_3C składnikami strukturalnymi (rys. 7.2) uwzględnia się go tylko dla zakresu stężeń węgla między punktami P i Q.

W prostokącie składników strukturalnych na rys. 7.2 zaznaczono maksymalny udział masowy Fe_3C''' (0,2% przy temperaturze pokojowej) oraz malejące do zera jego ilości – w stronę punktu S – w związku z malejącą zawartością ferrytu przedeutektoidalnego, oraz w lewo do punktu Q z powodu malejącej rozpuszczalności węgla w Fe_α .

Określenie udziałów (masowych) faz oraz składników strukturalnych w stali 0,3%C

Z punktu widzenia opisu fazowego stop ten przy temperaturze pokojowej składa się z ferrytu i cementytu. Udziały masowe obu faz można obliczyć z reguły dźwigni; np. udział ferrytu wynosi $(6,67-0,3)/(6,67-0,008) \cong 96\%$. Cementytu zatem w tej stali jest tylko ok. 4%. Na rys. 7.1

zamieszczono prostokąt udziałów faz, z którego również można odczytać przybliżone ich zawartości.

Dla wyznaczenia udziału składników strukturalnych (ferryt, perlit) w rozważanej stali zawierającej 0,3%C (stop I) można skorzystać z prostokąta składników strukturalnych zamieszczonego na rys. 7.2, lub również wykorzystać regułę dźwigni. Mianowicie, udział ferrytu w tej stali tuż przed przemianą eutektoidalną wynosi $(0,77 - 0,3)/(0,77 - 0,0218) \cong 63\%$. Resztę czyli ok. 37% stanowi austenit. Ponieważ cały austenit ulega przemianie w perlit, więc perlitu w tej stali jest ok. 37%.

Sformułowanie „tuż przed przemianą eutektoidalną ...” sugeruje, że stop nie osiągnął jeszcze temperatury A_1 . Istnieją zatem tylko dwie fazy: α oraz γ i zasadne jest stosowanie reguły dźwigni. Ponieważ w stanie „tuż przed przemianą” bardzo trudno jest precyzyjnie wyznaczyć stężenie węgla w fazie α i γ , stosuje się przybliżenie, przyjmując stężenia dane punktami P i S. Podobne uproszczenie zastosowano przy wyznaczaniu udziału faz i składników strukturalnych w następnych krzywych chłodzenia.

7.1.2.3. Stop II (0,77%C, stal eutektoidalna)

Do temperatury punktu 6 (rys. 7.2 i 7.3) istnieje jednorodna ciecz o zawartości 0,77%C (reszta żelazo). Przy temperaturze punktu 6 rozpoczyna się proces krzepnięcia cieczy od wydzielania się pierwszych kryształów austenitu. Wydzielające się kryształy γ są uboższe w węgiel niż ciecz z której zaczynają się wydzielać. Dla określenia ich składu należy poprowadzić z punktu 6 poziomy odcinek do przecięcia z linią solidus (punkt 6'), a następnie zrzutować go na oś stężeń.

W miarę obniżania się temperatury od punktu 6 do punktu 7 skład kryształów austenitu zmienia się wzdłuż linii solidus (JE), a skład cieczy wzdłuż linii likwidus (BC). Przy temperaturze punktu 7 kończy się proces krzepnięcia stopu.

W zakresie temperatur 7-8 następuje tylko stygnięcie austenitu.

Po osiągnięciu przez stop temperatury punktu S (727°C) austenit przemienia się przy stałej temperaturze w mieszaninę ferrytu i cementytu zwaną perlitem. Jest to przemiana eutektoidalna identyczna do tej, jaka zachodzi w stopie I gdy podczas chłodzenia osiągnie on temperaturę 727°C. Po jej zakończeniu następuje stygnięcie perlitu aż do temperatury pokojowej, podczas którego ferryt w perlicie zmienia swój skład od punktu P do punktu Q wskutek wydzielania cementytu. Cementyt ten nie jest jednak widoczny w strukturze stali ponieważ wydziela się na płytkach cementytu perlitycznego. Perlit jest zatem jedynym składnikiem strukturalnym tej stali.

Określenie udziałów (masowych) faz w stali 0,77%C (stop II)

Skład fazowy tego stopu przy temperaturze otoczenia można wyznaczyć korzystając z reguły dźwigni, czyli udział ferrytu i cementytu w omawianym stopie można wyznaczyć następująco. Ilość Fe_3C wynosi $(0,77-0,008)/(6,67-0,008) \cong 11\%$. Zatem w stali eutektoidalnej jest ok. 11% fazy węglkowej, natomiast resztę, czyli ok. 89% stanowi ferryt. Udział perlitu w tej stali wynosi 100%.

7.1.2.4. Stop III (1,5%C, stal nadeutektoidalna)

Krzepnięcie stopu rozpoczyna się przy temperaturze punktu 9 (rys. 7.2 i 7.3), a kończy przy temperaturze punktu 10. W tym zakresie temperatur z cieczy wydziela się austenit. Współistnieją zatem dwie fazy ($L+\gamma$) i liczba stopni swobody $s=n-f+1=2-2+1=1$. Stop ten nie krzepnie więc przy stałej temperaturze. Skład γ zmienia się od punktu 9' do 10. Między temperaturami punktów 10 i 11 zachodzi stygnięcie austenitu. Po osiągnięciu temperatury punktu 11 z austenitu zaczyna wydzielać się cementyt– faza bogata w węgiel, wobec czego austenit ubożeje w węgiel i zmienia swój skład wzdłuż linii ES. Ponieważ cementyt ten widoczny jest w strukturze jako oddzielny składnik dlatego zgodnie z opisem strukturalnym nazywany jest cementytem drugorzędowym (lub wtórnym). Rosnący udział tego Fe_3C przy obniżaniu temperatury obrazują

poziome odcinki, które można poprowadzić między linią ES i pionową przerywaną linią składu stopu III (rys. 7.1). Po obniżeniu temperatury do punktu 12 austenit osiąga skład punktu eutektoidalnego (0,77%C) i w stopie zachodzi przemiana austenitu w perlit – identyczna jak dla stopu II i stopu I. Czas trwania tej przemiany określa odcinek 12-12' na krzywej chłodzenia stopu III (rys. 7.3). Po zejściu przemiany stop stygnie do temperatury pokojowej. Wydzielające się wzdłuż linii PQ niewielkie ilości Fe_3C nie są widoczne w strukturze, wobec czego po ochłodzeniu do temperatury otoczenia mikrostruktura stopu składa się z perlitu, oraz cementytu wtórnego rozmieszczonego głównie po granicach ziarn byłego austenitu.

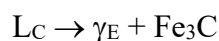
Wyznaczenie udziałów (masowych) faz oraz składników strukturalnych w stali o zawartości 1,5%C (stop III)

Stop ten składa się z dwóch faz: ferrytu i cementytu (rys. 7.1). Ilość Fe_3C można wyznaczyć z reguły dźwigni; wynosi ona $(1,5-0,008)/(6,67-0,008) \cong 22\%$. Pozostałość do 100% czyli ok. 78% stanowi ferryt.

Składnikami strukturalnymi stopu są: perlit i cementyt wtórny. Udział perlitu przy temperaturze otoczenia w strukturze tego stopu w przybliżeniu jest równy udziałowi austenitu tuż przed przemianą eutektoidalną i wynosi: $(6,67-1,5)/(6,67-0,77) \cong 88\%$. Ilość Fe_3C wynosi ok. 12%.

7.1.2.5. Stop IV (3,0%C, surówka podeutektyczna)

Krzepnięcie stopu rozpoczyna się przy temperaturze punktu 13 od wydzielania kryształów austenitu. W miarę obniżania się temperatury ich udział wzrasta, a skład zmienia się wzdłuż linii solidus (JE). Malejąca ilość cieczy zmienia swój skład wzdłuż linii likwidus (BC). Po dojściu temperatury do punktu 14 (1148°C) skład austenitu osiąga punkt E (2,11%C), a skład cieczy – punkt C (4,30%C), czyli skład eutektyki. Ciecz o tym składzie krystalizuje przy stałej temperaturze jako eutektyka – tutaj mieszanina kryształów austenitu i cementytu, co zapisujemy:



Przemiana ta trwa do wyczerpania cieczy o składzie punktu C. Ponieważ współistnieją wówczas trzy fazy, zatem liczba stopni swobody $s=n-f+1=2-3+1=0$ i na krzywej stygnięcia występuje przystanek, którego długość (14-14' na rys. 7.3) wyznacza czas przemiany. Krzepnięcie stopu IV zachodzi zatem w zakresie temperatur 13-14 i przebiega w dwóch etapach: najpierw z cieczy wydziela się austenit, potem z pozostałej cieczy równocześnie krystalizuje mieszanina kryształów: $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ aż do jej wyczerpania. Mieszanina ta nosi nazwę ledeburytu.

Dalsze obniżanie temperatury stopu od 1148°C do 727°C powoduje zmianę składu chemicznego austenitu wzdłuż linii ES. Z austenitu wydziela się cementyt, a sam austenit ubożeje w węgiel od zawartości 2,11% (punkt E) do zawartości 0,77%C (punkt S). Austenit osiągnąwszy skład punktu S ulega przemianie eutektoidalnej ($\gamma_S \rightarrow \alpha_P + \text{Fe}_3\text{C}$). Na krzywej stygnięcia pojawia się ponownie przystanek o długości 15-15' informujący o czasie trwania przemiany eutektoidalnej. Po jej zakończeniu, poniżej temperatury 727°C – nie ma już austenitu, który przemienił się w perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Ledeburyt, w którym ta przemiana także zachodzi, nosi nazwę ledeburytu przemienionego. Powstała mikrostruktura składa się zatem z perlitu, ledeburytu przemienionego i cementytu wtórnego.

Wyznaczenie udziałów (masowych) faz i składników strukturalnych w stopie IV (3%C)

W stopie tym przy temperaturze pokojowej występują dwie fazy: ferryt, oraz cementyt. Dla określenia ich zawartości wystarczy obliczyć udział jednej z nich, np. Fe_3C , bowiem ilość drugiej będzie dopełnieniem do 100%. Jak wynika z reguły dźwigni ilość cementytu w stopie

zawierającym 3%C wynosi $(3,0\%-0,008\%)/(6,67\%-0,008\%) \cong 45\%$. Zatem udział ferrytu wynosi ok. 55%.

Jak wspomniano wyżej, w stopie tym występują następujące składniki strukturalne: 1) ledeburyt przemieniony, 2) perlit, 3) cementyt wtórny.

- ad. 1. Udział ledeburytu przemienionego jest równy ilości ledeburytu; ta zaś jest w przybliżeniu równa ilości cieczy, jaka była w stopie IV przed przemianą eutektyczną. Ilość ta wynosi: $(3,0\%-2,11\%)/(4,3\%-2,11\%) \cong 41\%$ i w przybliżeniu tyle też jest zatem ledeburytu przemienionego.
- ad. 2. Ilość perlitu jest równa ilości austenitu przedeutektycznego jaka była pierwotnie, ale pomniejszonej o udział wydzielonego cementytu wtórnego. Austenitu z cieczy zdążyło się wydzielić: $100\%-41\% = 59\%$. Z kolei podczas chłodzenia w zakresie $1148-727^{\circ}\text{C}$ z tej ilości austenitu wydzieliło się $(2,11-0,77)/(6,67-0,77) \cong 23\%$ $\text{Fe}_3\text{C}''$, co stanowi $0,59 \cdot 23\% = 13,6\%$ w całym stopie. Zatem austenitu zostało tylko $59\%-13,6\% = 45,4\%$. I taka jest też ilość perlitu po przemianie eutektoidalnej w tym stopie.
- ad. 3. Wydzielony przed przemianą eutektoidalną cementyt wtórny w ilości 13,6% pozostaje w niezmienionej ilości po przemianie eutektoidalnej.

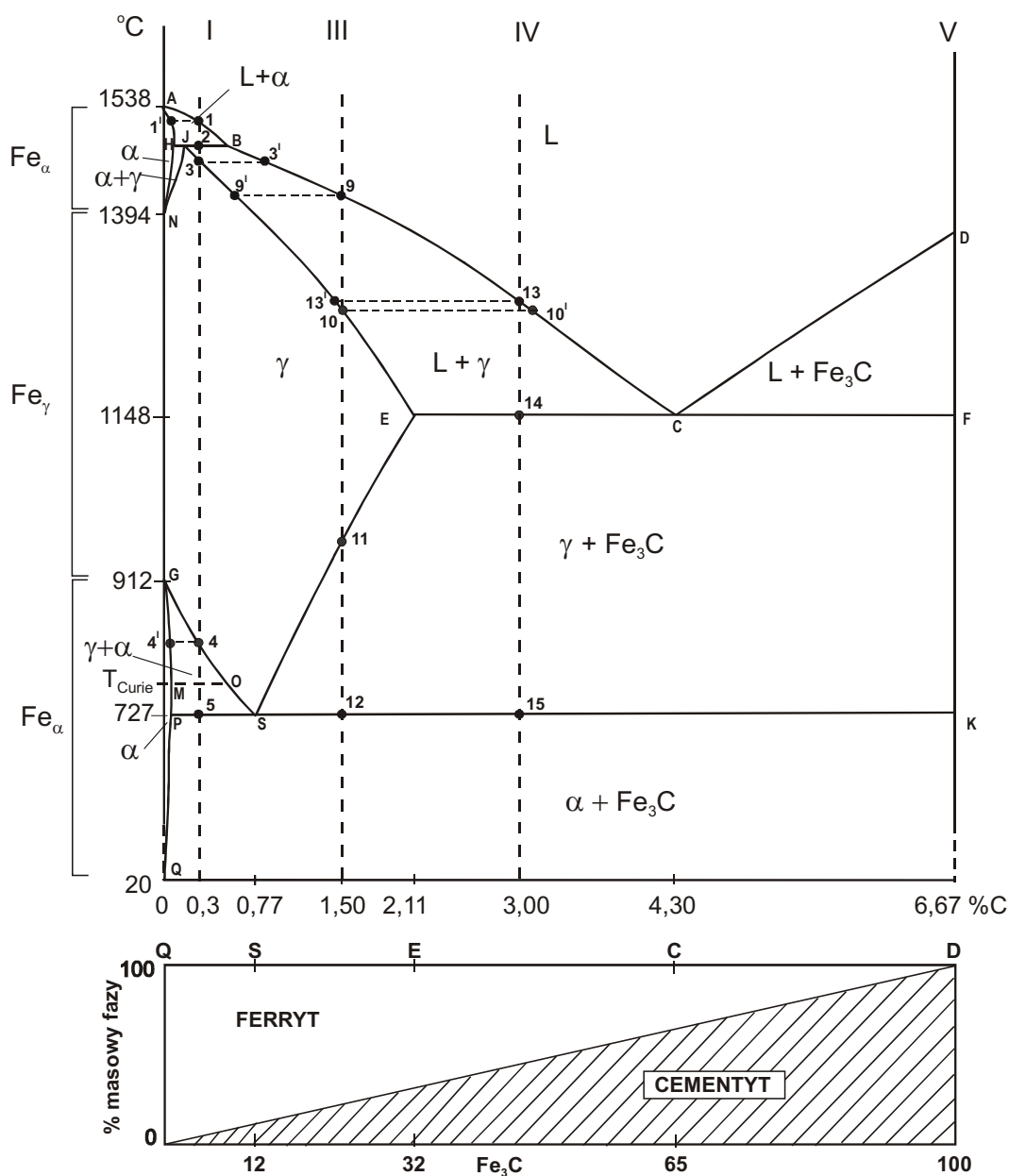
Reasumując można stwierdzić, że stop o zawartości 3%C zawiera przy temperaturze pokojowej 41% ledeburytu przemienionego, 45,4% perlitu oraz 13,6% cementytu wtórnego. Mikrostruktura zawiera zatem trzy składniki strukturalne, przy czym pod mikroskopem widać jaśniejszy ledeburyt przemieniony, oraz ciemny perlit wewnątrz którego są jasne wydzielienia cementytu wtórnego.

Omawiany stop, z punktu widzenia technologicznego, można w przybliżeniu uważać za surówkę wielkopiecową, której używa się do produkcji zarówno stali (w konwertorach), jak i żeliw szarych (w żeliwiakach). Z kolei gotowe odlewy ze stopów tego typu – gdzie cały węgiel związany jest w postaci cementytu – nazywane są żeliwami białymi, od wyglądu przełomu, który jest jasny.

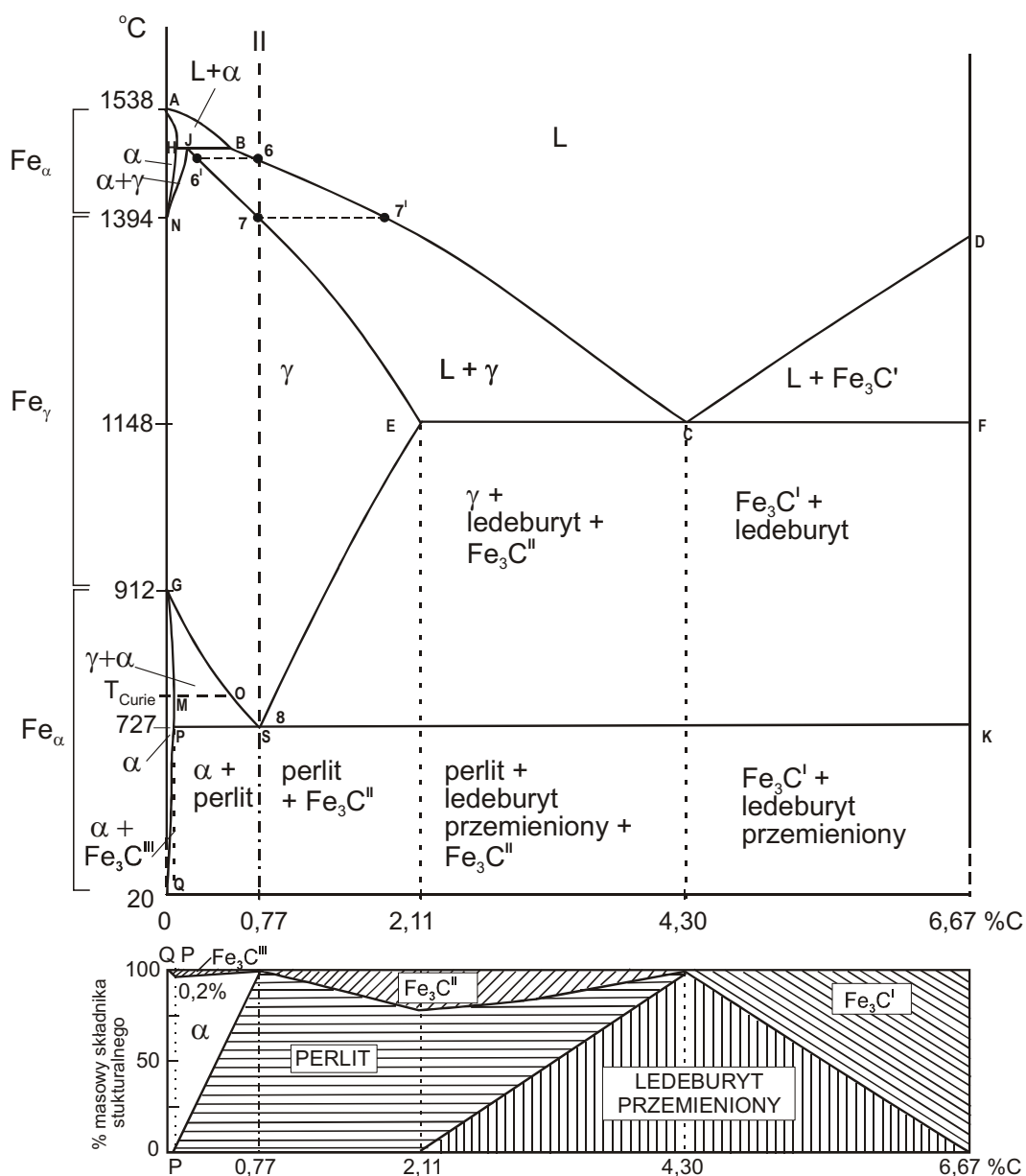
7.1.2.6. Stop V (6,67%C, cementyt)

Stop o składzie 6,67%C jest nietypowy, ponieważ przy tej zawartości węgla tworzy się związek chemiczny żelaza z węglem o wzorze Fe_3C . Ma on – zgodnie z podstawowymi własnościami związków chemicznych – stałą temperaturę topnienia i krystalizacji – punkt D na wykresie Fe- Fe_3C . Czysty związek, z punktu widzenia reguły faz, można uważać za układ jednoskładnikowy, w związku z czym liczba stopni swobody przy temperaturze topnienia $s = 1 - 2 + 1 = 0$. Na krzywej chłodzenia jest zatem tylko jeden przystanek przy temperaturze punktu D czyli 1227°C . Przy tej temperaturze cała ciecz krystalizuje w postaci cementytu. Nie ma natomiast na krzywej chłodzenia ani przemiany eutektycznej, ani eutektoidalnej. Wyróżnia się dla cementytu tylko temperaturę przemiany magnetycznej $A_0 = 230^{\circ}\text{C}$, poniżej której ma on własności ferromagnetyczne. Temperaturę topnienia cementytu trudno dokładnie wyznaczyć ze względu na jego małą stabilność przy wysokich temperaturach, kiedy to rozkłada się wg reakcji: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$, przy czym węgiel wydziela się w postaci grafitu. Reakcja ta ma duże znaczenie praktyczne przy produkcji żeliw ciągliwych.

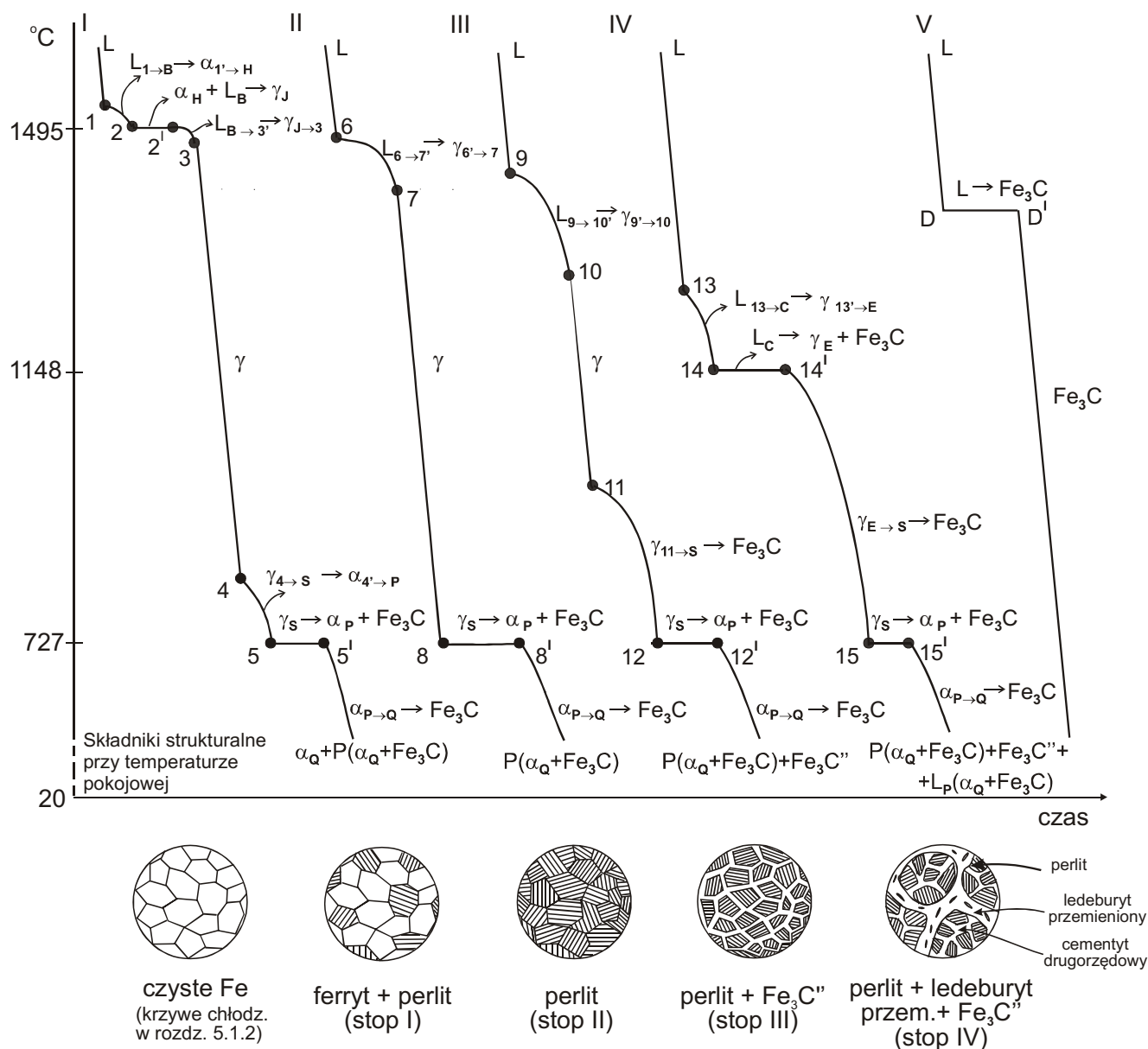
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	M	N	O	P	S	Q
%C	0	0,53	4,30	6,67	2,11	6,67	0	0,09	0,17	6,67	0,0168	0	0,45	0,0218	0,77	0,008
°C	1538	1495	1148	1227	1148	1148	912	1495	1495	727	770	1394	770	727	727	20



Rys. 7.1. Fragment układu Fe-C do zawartości węgla 6,67% masowych (układ Fe-Fe₃C). Poszczególne pola opisano fazowo. Rzymskimi cyframi I, III, IV i V zaznaczono stopy, dla których krzywe chłodzenia zamieszczono na rys. 7.3. Poniżej układu znajduje się tzw. prostokąt udziałów faz występujących przy temperaturze pokojowej



Rys. 7.2. Fragment układu Fe-C do zawartości węgla 6,67% masowych (układ Fe-Fe₃C). Poszczególne pola opisano składnikami strukturalnymi. Cyfrą rzymską II zaznaczono stop o zawartości 0,77%C. Krzywa chłodzenia tego stopu jest zamieszczona na rys. 7.3. Poniżej układu znajduje się tzw. prostokąt udziałów składników strukturalnych występujących przy temperaturze pokojowej.



Rys. 7.3. Krzywe chłodzenia dla stopów o różnej zawartości węgla.

Duże strzałki przy opisie krzywych należy interpretować jako:

- przemianę jednej fazy w inną fazę, np. $L \rightarrow \gamma$
- przemianę jednej fazy w mieszaninę dwóch faz, np. $\gamma_s \rightarrow \alpha_p + Fe_3C$,
- przemianę dwóch faz w jedną fazę, np.: $\alpha_H + L_B \rightarrow \gamma_J$.

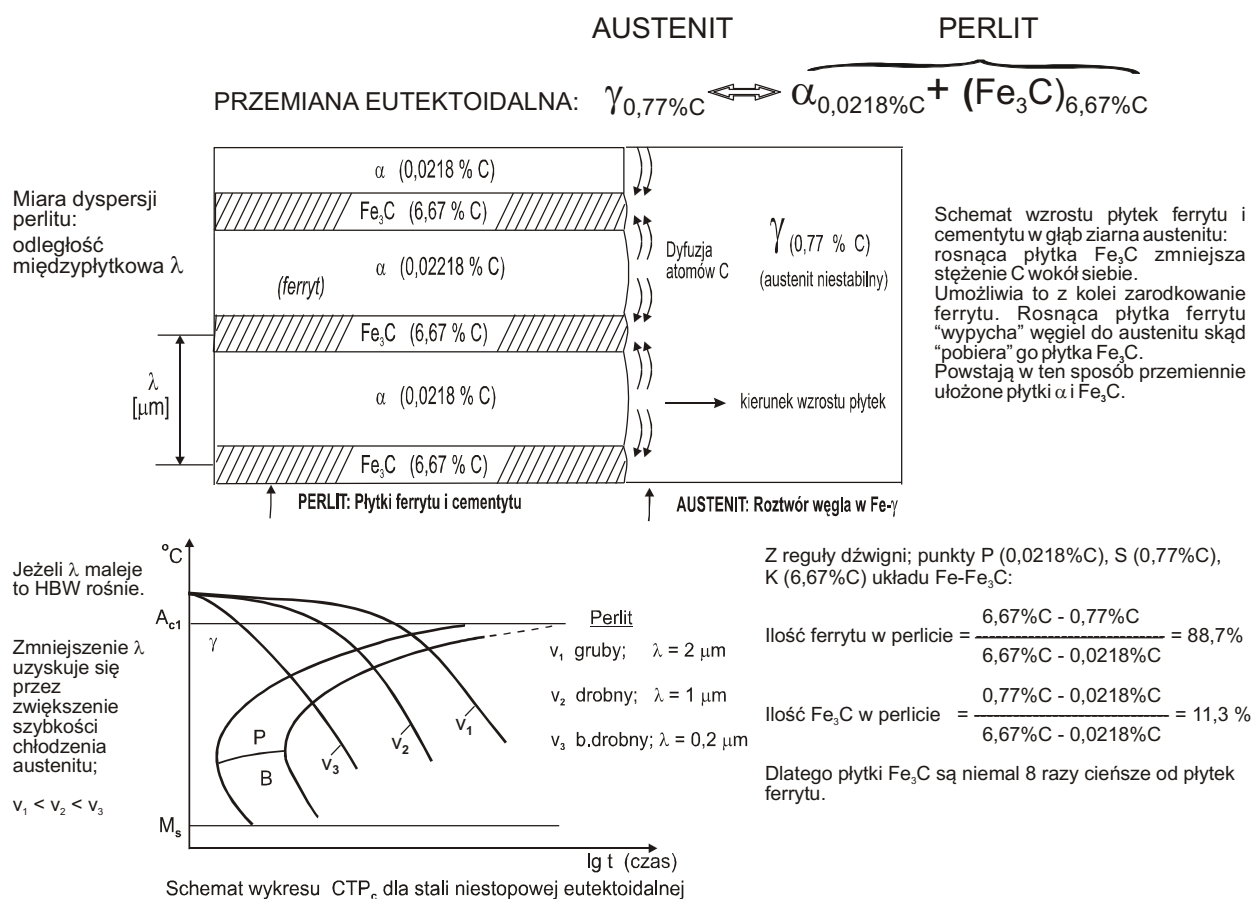
Małe strzałki w indeksach oznaczają zmieniający się skład faz wraz z obniżaniem się temperatury. Indeksy bez strzałek oznaczają stały skład faz gdy $s = 0$.

7.2. Składniki strukturalne stali niestopowych, surówek i żeliw

Przez mikrostrukturę rozumiemy obrazy widziane przy użyciu mikroskopu świetlnego, a więc przy powiększeniach do ok. 2000x. W rozważaniach bardziej ogólnych pojęcie mikrostruktury rozszerza się na obrazy otrzymane przy zastosowaniu mikroskopów elektronowych. Wyróżnione fragmenty mikrostruktury, jednorodne morfologicznie, nazywamy składnikami strukturalnymi. W stopach żelaza z węglem są nimi zarówno fazy takie jak: ferryt, cementyt, austenit, grafit, jak i mieszaniny faz, np. perlit, ledeburyt, czy ledeburyt przemieniony.

7.2.1. Składniki strukturalne występujące w stalach

- Ferryt.** Międzywęzłowy roztwór stały węgla w żelazie alfa, który oznaczamy literą α . Pod mikroskopem ferryt ujawnia się w postaci jasnych obszarów oddzielonych ciemnymi, nieregularnymi liniami.
- Cementyt.** Związek żelaza z węglem o wzorze Fe_3C (25% atomowych C co stanowi 6,67% masowych C). W układzie Fe- Fe_3C wyróżnia się:
- cementyt pierwszorzędowy, wydzielający się z cieczy, gdy ciecz zmienia swój skład wzdłuż linii D-C,
 - cementyt drugorzędowy (wtórny), wydzielający się z austenitu przedeutektycznego, gdy austenit zmienia swój skład wzdłuż linii E-S,
 - cementyt trzeciorzędowy, wydzielający się z ferrytu przedeutektoidalnego, gdy ferryt zmienia swój skład wzdłuż linii P-Q.
- Cementyt pierwszorzędowy obserwuje się w surówkach nadeutektycznych w postaci jasnych igieł na tle ledeburytu przemienionego.
- Cementyt drugorzędowy widoczny jest w stalach nadeutektoidalnych w postaci siatki otaczającej ziarna byłego austenitu.
- Cementyt trzeciorzędowy obserwuje się jako pojedyncze wydzielenia po granicach ziarn ferrytu.
- Austenit.** Międzywęzłowy roztwór stały węgla w żelazie gamma; oznaczany jako γ . Austenit występuje po nagrzaniu stali powyżej temperatury eutektoidalnej P-S-K (727°C). Jest fazą wyjściową do otrzymywania innych struktur, np. perlitu, troostytu, bainitu, martenzytu.
- W stalach niestopowych w stanie wyżarzonym przy temperaturze pokojowej, austenit nie występuje. Może się natomiast pojawić po hartowaniu tych stali, obok martenzytu; nazywa się go wówczas austenitem szczątkowym albo resztkowym.
- Perlit.** Mieszanina ferrytu i cementytu powstająca z austenitu w wyniku przemiany eutektoidalnej.
- Schemat dwuwymiarowy tej przemiany przedstawiono na rys. 7.4.
- Perlit przy powiększeniu ok. 1000x ujawnia wyraźnie swą budowę płytkową; przy powiększeniu ok. 400x płytki α i Fe_3C mogą być jeszcze dość dobrze rozróżnialne, ale przy powiększeniu ok. 100x identyfikujemy perlit jako ciemne miejsca obok jasnych, którymi w stalach jest ferryt lub cementyt drugorzędowy (jeśli zgląd trawiono nitałem).
- Dla stali o zawartości 0,77%C (stal eutektoidalna) obserwuje się w strukturze 100% perlitu. Stal taka jest stalą wysokowęglową, narzędziową.
- Dla stali nadeutektoidalnych (kolejne stale narzędziowe) obok perlitu pojawiać się będą coraz większe ilości $\text{Fe}_3\text{C}''$ w postaci wydzielen po granicach ziarn byłego austenitu.



Rys. 7.4. Dwuwymiarowy model przemiany eutektoidalnej w stali

7.2.2. Składniki strukturalne surówek i żeliw białych

Oprócz ww. składników strukturalnych w surówkach i żeliwach białych (stopach zawierających powyżej 2,11%C) występują dwa kolejne, a mianowicie ledeburyt oraz ledeburyt przemieniony.

Ledeburyt. Mieszanina austenitu i cementytu powstająca z cieczy o składzie eutektycznym (4,3%C) przy temperaturze 1148°C. Jest to składnik strukturalny występujący zarówno w surówkach jak i żeliwach białych w zakresie temperatur 1148÷727°C. Bezpośrednio po utworzeniu ledeburyt zawiera 48% Fe_3C , oraz 52% austenitu o składzie punktu E (2,11%C). W trakcie chłodzenia w zakresie temperatur 1148÷727°C z austenitu ledeburytycznego wydziela się cementyt, co daje w efekcie obniżenie zawartości austenitu w ledeburycie z 52% do 29% i zubożenie γ w węgiel od zawartości 2,11% do 0,77%. Austenit ledeburytu o tym składzie ulega przemianie eutektoidalnej.

Ledeburyt

przemieniony. Ledeburyt, w którym zaszła przemiana eutektoidalna austenitu w perlit. Składnik strukturalny surówek i żeliw białych przy temperaturach pokojowych. Dla surówki eutektycznej stanowi 100% mikrostruktury. Dla surówek podeutektycznych ilość ledeburytu przemienionego maleje od 100% do 0%, gdy zawartość węgla zmienia się od 4,3% do 2,11%. Dla surówek nadeutektycznych udział ledeburytu przemienionego maleje od 100% do 0%, gdy zawartość węgla rośnie od 4,3% do 6,67%C. W surówkach podeutektycznych (2,11%C do 4,3%C) widoczny jako jaśniejszy składnik, obok ciemnego perlitu, w którym występują wydzieliska cementytu drugorzędowego. W surówkach

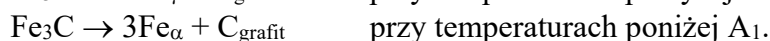
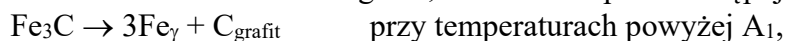
nadeutektycznych (4,3%C do 6,67%C) ledeburyt przemieniony jest osnową dla dużych, jasnych wydzielen cementytu pierwszorzędowego.

Kryterium podziału na surówki i żeliwa białe nie jest mikrostruktura, ani skład chemiczny, lecz ich przeznaczenie. Surówki są materiałem wyjściowym do produkcji stali i żeliw. Natomiast żeliwa białe są stosowane jako materiały narzędziowe w postaci odlewów lub jako półprodukt do wytwarzania żeliw ciągłych.

7.2.3. Składniki strukturalne żeliw szarych

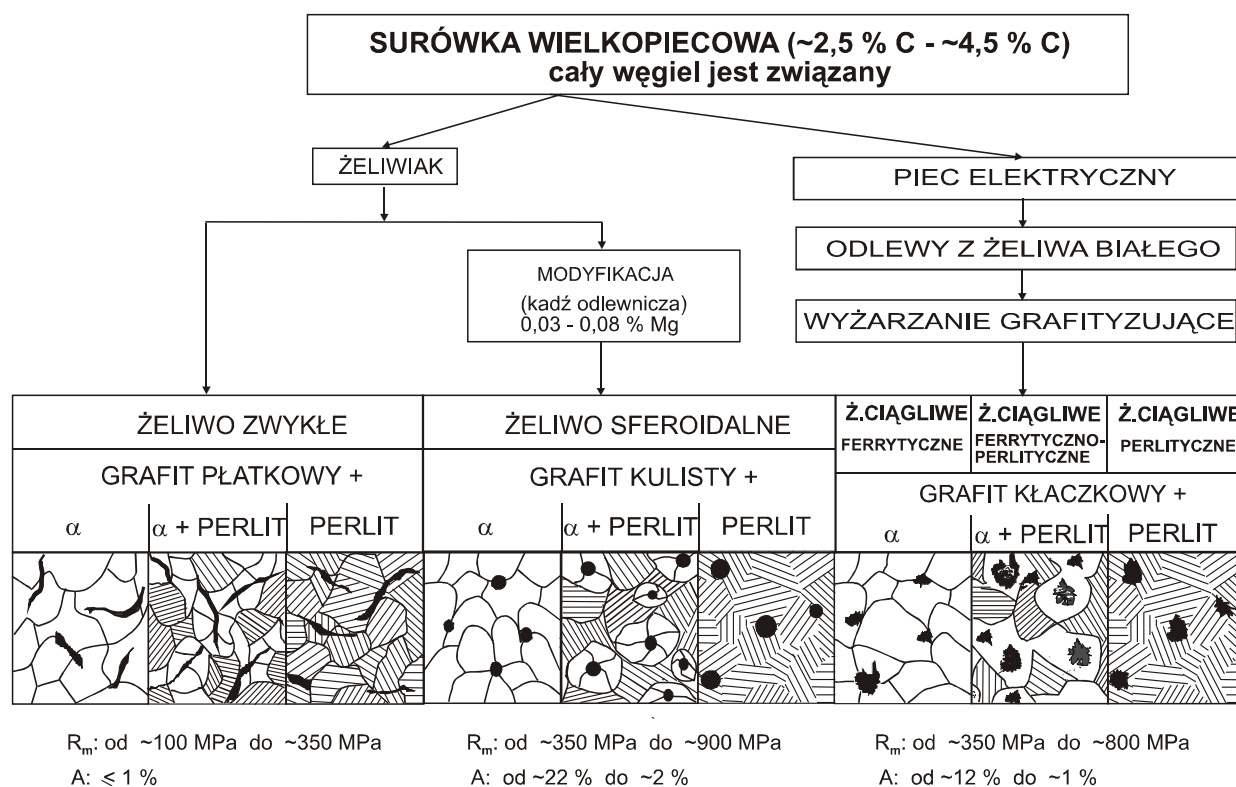
Do żeliw szarych zaliczamy te żeliwa, które zawierają grafit. Wyróżnia on żeliwa szare od żeliw białych, w których wolny węgiel (grafit) nie występuje, ponieważ jest całkowicie związany w postaci cementytu. Stabilizację cementytu w żeliwach białych zapewnia mangan, który utrudnia grafityzację. Przełom żeliwa białego jest jasny, w odróżnieniu od szarego przełomu żeliwa z grafitem – stąd też nazwa: żeliwa szare.

Występowanie wolnego grafitu w żeliwach szarych jest związane z zawartością krzemu (0,3÷5%), który sprzyja grafityzacji. Krzem wprowadza się do stopu w postaci żelazokrzemu, w trakcie wytwarzania żeliwa w żeliwiaku. Możliwe jest też otrzymywanie żeliw szarych przez wyżarzanie odlewów z żeliwa białego (tzw. wyżarzanie grafityzujące). Cementyt żeliwa białego ulega wówczas rozkładowi na żelazo i grafit, co można zapisać następująco:



Grafit w żeliwach szarych może przybierać różne kształty, a mianowicie płatków, sferoidów (kul), postrzępionych wydzielen (tzw. grafit kłaczkowy), lub kształty przypominające robaczki – stąd nazwa: grafit wermikularny (z ang. vermicule = robaczek).

Na **rys. 7.5** przedstawiono zarys technologii oraz możliwe struktury a także własności mechaniczne podstawowych gatunków żeliw szarych.



Rys. 7.5. Zarys technologii, mikrostruktura oraz własności mechaniczne podstawowych gatunków żeliw szarych

Jak wynika z rys. 7.5 w każdym z trzech gatunków możemy wyróżnić ośnowę metaliczną (ferryt; ferryt + perlit; perlit) oraz grafit, którego kształt informuje zarówno o historii materiału (zastosowanej technologii) jak i ostatecznych właściwościach mechanicznych i w związku z tym o zastosowaniu danego żeliwa.

Dla każdego z tych gatunków zmiana struktury osnowy od ferrytu, poprzez rosnącą zawartość perlitu aż do 100 % perlitu, powoduje zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie. Ujawnia się przy tym korzystny wpływ kształtu grafitu; dla żeliw z grafitem kulistym i kłaczkowym najmniejsza wartość R_m jest równa największej wartości R_m dla żeliw zwykłych z grafitem płatkowym.

Najlepsze własności plastyczne ma żeliwo sferoidalne o osnowie ferrytycznej (wydłużenie względne wynosi ok. 22 %). Składa się na to zarówno miękka osnowa (ferryt) jak i korzystny - sferoidalny kształt grafitu.

7.3. Stale niestopowe i systemy ich oznaczania

Stalami nazywamy przerobione plastycznie stopy żelaza z węglem i innymi pierwiastkami zawierające do 2,11% węgla. Stopy żelaza z węglem zawierające do 2,11% węgla, nie przerobione plastycznie lecz odlane do form, gdzie uzyskują ostateczny kształt, nazywamy staliwami.

Stale są stopami technicznymi żelaza z węglem. Oznacza to, że oprócz tych dwóch pierwiastków występują jeszcze inne; np. Mn i Si (domieszki pożądane, dodawane celowo) oraz S i P (domieszki na ogół szkodliwe, których całkowite usunięcie ze stali jest nieopłacalne).

Z określoną zawartością poszczególnych pierwiastków wiąże się podział na stale niestopowe i stopowe. Na przykład dla Mn graniczną zawartością jest 1,65%, a dla Si 0,5%. Poniżej tych zawartości mamy stale niestopowe, powyżej – stopowe, odpowiednio manganowe lub krzemowe. Dla innych pierwiastków graniczne wartości zestawiono w normie PN-EN 10020 (por. rozdz. 8 oraz klasyfikację stali, zamieszczoną w Dodatku na końcu tego skryptu). Ze

względem na zastosowanie stale niestopowe wygodnie jest podzielić na konstrukcyjne i narzędziowe. Ogólnie można powiedzieć, że stale konstrukcyjne zawierają do ok. 0,65%C, a narzędziowe od tej zawartości do ok. 1,7%C (teoretycznie do 2,11% - punkt E na wykresie Fe-Fe₃C). Ze wzrostem zawartości węgla w stali rośnie jej twardość i wytrzymałość na rozciąganie, maleją zaś własności plastyczne. Stąd stale narzędziowe są z reguły twardsze od stali konstrukcyjnych.

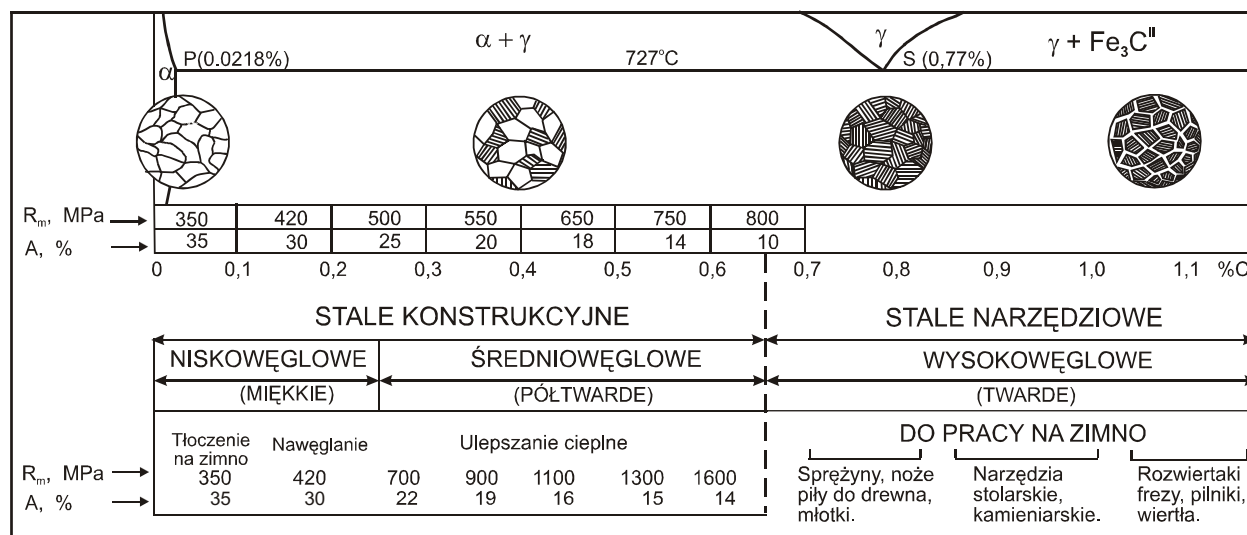
W grupie stali niestopowych możemy wyróżnić gatunki niskowęglowe (miękkie - do ok. 0,25%C), które są gatunkami spawalnymi, średniowęglowe (półtwarde - od 0,25%C do 0,65%C) a także wysokowęglowe (twarde - powyżej 0,65%C).

Na rys. 7.6 zilustrowano ww. podział stali niestopowych w nawiązaniu do fragmentu układu Fe-Fe₃C. Zaznaczono również typowe mikrostruktury tych stali w stanie wyżarzonym, oraz orientacyjne wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m i wydłużenia procentowego A dla stali konstrukcyjnych w stanie wyżarzonym i w stanie ulepszonym cieplnie. Podano również przykłady zastosowań stali narzędziowych.

Zgodnie z PN-EN 10020:2003 stale niestopowe dzielimy na dwie klasy: 1) stale jakościowe oraz 2) stale specjalne.

Do stali jakościowych należą te gatunki, które na ogół mają określone wymagania dotyczące własności, takie jak na przykład ciągliwość, regulowaną wielkość ziarna i/lub podatność na przeróbkę plastyczną.

Do stali niestopowych specjalnych zalicza się te gatunki, które cechuje wysoki stopień czystości metalurgicznej, wyrażający się niską zawartością wtrąceń niemetalicznych (siarczki, tlenki i inne wtrącenia). Poza tym wymaga się od nich (opcjonalnie): określonej udarności w stanie ulepszonym cieplnie, określonej hartowności i niskiej ($\leq 0,020\%$) zawartości fosforu i siarki (dla każdego osobno). Kolejne wymagania – związane z zastosowaniem – zestawione są w ww. normie PN-EN 10020. Jako przykłady zastosowania stali tej klasy można podać zbiorniki ciśnieniowe, reaktory jądrowe, części do nawęglania, narzędzia do pracy na zimno.



Rys. 7.6. Charakterystyczne mikrostruktury stali niestopowych w stanie wyżarzonym, orientacyjne wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m i wydłużenia procentowego A dla wybranych przykładów stali konstrukcyjnych oraz przykłady zastosowań stali narzędziowych

Oznaczanie stali wg PN-EN 10027-1 może odbywać się dwoma sposobami. Pierwszy sposób jest związany z zastosowaniem i własnościami mechaniczno-fizycznymi, drugi - ze składem chemicznym.

Oznaczanie wg sposobu pierwszego składa się z:

1) symboli głównych, 2) symboli dodatkowych, 3) symboli oznaczających specjalne wymagania np. odnośnie wielkości ziarna czy hartowności, 4) symboli określających rodzaj powłoki na wyrobie gotowym, np. powłoka organiczna, powlekanie cyną na gorąco, itd.

Ograniczając się do symboli głównych wyróżnia się następujące:

- a) S - stale konstrukcyjne,
P - stale pracujące pod ciśnieniem,
L - stale na rury przewodowe,
E - stale maszynowe,
za którymi umieszcza się minimalną granicę plastyczności w MPa, np. S235, P265, L360, E295;
- b) B - stale do zbrojenia betonu, za którym umieszcza się wymaganą minimalną granicę plastyczności w MPa, np. B500;
- c) Y - stale do betonu sprężonego, za którym umieszcza się wymaganą minimalną wytrzymałość na rozciąganie w MPa, np. Y1800;
- d) R - stale na szyny, za którym umieszcza się liczbę będącą wymaganą minimalną wytrzymałością na rozciąganie w MPa, np. R0960;
- e) H - stale na wyroby płaskie, walcowane na zimno, za którym umieszcza się minimalną granicę plastyczności, lub wytrzymałości na rozciąganie w MPa, np. H450 lub HT1100;
- f) D - stale na wyroby płaskie ze stali miękkich, za którym umieszcza się specjalne symbole (bliższa informacja: Dodatek na końcu książki);
- g) T - stale na wyroby z blachy ocynkowanej, za którym umieszcza się specjalne symbole (patrz: Dodatek na końcu książki);
- h) M - stale elektrotechniczne za którym umieszcza się specjalne symbole (bliższa informacja: patrz Dodatek na końcu książki).

Drugi sposób oznaczania stali uwzględnia ich skład chemiczny. Wyróżnia się dwie grupy oznaczeń stali niestopowych. Pierwsza grupa dotyczy stali niestopowych o średniej zawartości $Mn < 1\%$ (bez stali automatowych). Symbol główny tej grupy to litera C i liczba będąca 100-krotną średnią wymaganą zawartością procentową węgla w stali, np. stal oznaczona C15 zawiera 0,15% węgla. Druga grupa oznaczeń stali niestopowych dotyczy stali o średniej zawartości $Mn \geq 1\%$ do maksymalnej zawartości $Mn_{max} = 1,80\%$, oraz niestopowych stali automatowych. Symbolem głównym stali jest wówczas liczba będąca 100-krotną średnią wymaganą zawartością procentową węgla w stali, oraz symbol Mn uzupełniony liczbą będącą średnim procentem zawartości tego pierwiastka pomnożonym przez 4 i zaokrąglonym do najbliższej liczby całkowitej, np. 28Mn6.

Istnieje również system cyfrowy oznaczania stali zamieszczony w PN-EN 10027-2. Według tego systemu cyfra: 1 na pierwszej pozycji jest zastrzeżona dla stali. Dalsze dwie cyfry oznaczają numer grupy stali. Dla stali niestopowych jakościowych zarezerwowano cyfry od 01 do 07, oraz od 91 do 97; a dla stali niestopowych specjalnych cyfry od 10 do 18. Kolejne dwie cyfry oznaczają kolejny numer stali w danej grupie. System cyfrowy oznaczania stali jest bardziej przydatny w technice cyfrowej przetwarzania danych. Szczegóły tego systemu zamieszczono w „Dodatku” na końcu książki.

7.4. Surówki

Materiałem wyjściowym do produkcji stali i żeliw jest surówka wytapiana w wielkich piecach. Surówka jest to stop żelaza z węglem i innymi pierwiastkami (Mn, Si, P, S), w którym zawartość węgla mieści się w granicach $2,5 \div 4,3\%$.

Produkcja stali płynnej z surówki (tzw. surówki przeróbczej) polega na zmniejszeniu w niej zawartości węgla poniżej 2,11%. Odbywa się to w urządzeniach zwanych konwertorami. Po spuszczeniu stali z konwertora do tzw. pieco-kadzi, gdzie następuje ustalenie jej oczekiwanego

składu chemicznego, płynna stal zostaje przelana do kadzi odlewniczej, z której jest odlewana we wlewki do form zwanych wlewnicami. Wlewki przerabia się plastycznie na gorąco poprzez walcowanie lub kucie.

Płynną stal można również odlewać metodą ciągłą (metoda COS) do krystalizatora, w wyniku czego otrzymuje się tzw. wlewek ciągły, który jest następnie poddawany walcowaniu.

Stal może być również produkowana ze złomu w piecach łukowych lub indukcyjnych. Surówka jest używana również do produkcji żeliwa jako tzw. surówka odlewnicza. Jest ona wówczas przetapiana w żeliwiaku z dodatkami złomu żeliwnego i stalowego, żelazokrzemu, żelazomanganu, przy czym zawartość węgla pozostaje większa od 2,11%. Po odlaniu do form odlewniczych żeliwo nabiera ostatecznego kształtu, stając się gotowym materiałem konstrukcyjnym w postaci odlewu (nie jest zatem poddawane przeróbce plastycznej).

7.5. Żeliwa i ich oznaczanie

Żeliwa są stopami odlewniczymi, przeznaczonymi do wytwarzania części o skomplikowanych kształtach. W porównaniu ze stalami niestopowymi w żeliwach jest więcej nie tylko węgla (teoretycznie od 2,11 % do 6,67 %), lecz także Mn, Si, S i P. Własności odlewu (i jego struktura) zmieniają się w szerokich granicach w zależności od składu chemicznego i zastosowanej technologii odlewania.

Ogólnie możemy otrzymać:

- żeliwa białe, w których całkowita (lub prawie całkowita) zawartość węgla jest związana w postaci cementytu,
- żeliwa połowiczne (pstre), w których cementyt uległ w znacznym stopniu grafityzacji,
- żeliwa szare, w których – obok osnowy metalicznej – występuje grafit.

Żeliwo białe (całkowicie białe) ma ograniczone zastosowanie z powodu kruchości i trudnej obróbki. Odlewy takie stosuje się gdy wymagana jest bardzo duża odporność na ścieranie, np. wykładziny i ślimaki mieszalników materiałów sypkich, kule w młynach kulowych, klocki hamulcowe itp. Duże ilości żeliwa białego używane są do otrzymywania żeliwa ciągliwego. Powstawaniu struktury żeliwa białego sprzyja niska zawartość krzemu i szybkie chłodzenie.

Skład żeliwa połowicznego dobiera się w ten sposób aby przy powierzchni odlewu powstała warstwa żeliwa białego (szybsze odprowadzenie ciepła) a wewnątrz - krzepnięcie przebiegało z wydzielaniem grafitu. Pomiędzy tymi warstwami występuje strefa przejściowa, gdzie obok struktury żeliwa białego istnieje struktura z wydzieleniami grafitu. Przełom takiej strefy jest miejscami biały a miejscami szary, stąd nazwa żeliwo pstre.

Żeliwa szare są używane najczęściej. Ich podział opiera się na kształcie grafitu. Wyróżnia się żeliwa: zwykłe, sferoidalne, wermikularne i ciągliwe. W żeliwie zwykłym występuje grafit płatkowy, w sferoidalnym kulisty, w wermikularnym grafit o kształcie robaczkowym, zaś w ciągliwym - postrzępiony (kłaczkowy).

Obecność grafitu sprawia, że w porównaniu ze stalami, żeliwa są materiałami kruchymi. Porównując poszczególne żeliwa szare między sobą widać poprawę własności plastycznych wraz ze zmianą kształtu grafitu od płatków przez grafit kłaczkowy i wermikularny do grafitu o kształcie kulistym. Wiąże się to z faktem, że wydzielania grafitu działają jak nieciągłości w materiale. Dlatego najmniejszą plastyczność i odporność na pękanie mają żeliwa z grafitem płatkowym o ostrych krawędziach, dających koncentrację naprężeń (efekt działania karbu).

Pomimo małej odporności na pękanie żeliwa są cennym materiałem konstrukcyjnym ze względu na:

- łatwość wytwarzania części o skomplikowanych kształtach,
- dużą zdolność do tłumienia drgań,
- bardzo dobrą skrawalność,
- dobrą odporność na ścieranie,
- dobrą wytrzymałość na ściskanie,
- niską cenę.

Żeliwo zwykłe - jest najstarszym stosowanym żeliwem szarym. Wyróżnia się sześć jego gatunków, w których minimalne wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m wyrażonej w MPa wynoszą odpowiednio: 100, 150, 200, 250, 300, 350. Wytrzymałość na ściskanie jest około 4 razy większa niż wytrzymałość na rozciąganie. Natomiast wydłużenie jest bardzo małe i nie przekracza 1%. Możliwa mikrostruktura: osnowa metaliczna (ferrytyczna α , ferrytyczno-perlityczna $\alpha + P$, lub perlityczna P) z grafitem płatkowym. Zastosowanie: grzejniki, korpusy i łoża obrabiarek, płyty fundamentowe różnych maszyn, cylindry i tłoki silników spalinowych.

Wytrzymałość i plastyczność żeliwa zwykłego można wyraźnie poprawić przez dodanie do niego w czasie odlewania magnezu lub też tzw. mischmetal (pierwiastki ziem rzadkich).

Zależnie od składu chemicznego żeliwa wyjściowego, ilości modyfikatorów i warunków wypełniania form odlewniczych można uzyskać grafit o kształcie robaczkowym (żeliwo wermikularne) albo w postaci kulistej (żeliwo sferoidalne). Dla żeliwa wermikularnego R_m (zależnie od gatunku), osiąga wartości: 250, 300, 350, 400 i 450 MPa a minimalne wydłużenie wynosi odpowiednio: 3; 1,5; 1,1; 1% (wg ASTM A842-85). Możliwa mikrostruktura: osnowa metaliczna (α , $\alpha + P$; P) oraz grafit o kształcie robaczkowym.

Dla żeliw sferoidalnych uzyskuje się jeszcze lepsze wskaźniki; wytrzymałość na rozciąganie wynosi od 350 do 900 MPa a wydłużenie względne od 2 do 22% zależnie od mikrostruktury żeliwa, w której obok grafitu kulistego (sferoidalnego) może być ferryt, ferryt z perlitem, bądź perlit.

Zastosowanie: wały korbowe, obudowa skrzyni biegów, walce, tłoki, koła zębate. Dodatkowe wprowadzenie do żeliwa sferoidalnego pierwiastków stopowych, połączone następnie z obróbką cieplną, stwarza dalsze możliwości zwiększenia wytrzymałości i plastyczności tych żeliw.

Otrzymywanie żeliwa ciągliwego różni się od poprzednich technologii i polega na wyżarzeniu gotowych odlewów z żeliwa białego. Podczas wyżarzania następuje rozkład cementytu na grafit: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$; gdzie C oznacza węgiel żarzenia (grafit kłaczkowy). Jeśli odbywa się to w atmosferze odwęglającej to otrzymujemy żeliwo ciągliwe białe, jeśli zaś w obojętnej - otrzymujemy żeliwo ciągliwe czarne lub perlityczne.

Mikrostruktura: osnowa metaliczna (α , $\alpha + P$, P) oraz grafit kłaczkowy. Zastosowanie: części samochodów, wagonów, maszyn, klucze do nakrętek, bębny hamulcowe.

Podział i oznaczanie żeliw ujemuje norma PN-EN 1560:2001. Podobnie jak przy stalach również i tutaj wyróżnia się oznaczenia albo na podstawie symboli, albo na podstawie cyfr i liter.

Oznaczanie żeliw na podstawie symboli może zawierać najwyżej sześć pozycji. Są to:

- Pozycja 1 - przedrostek EN – (dla materiałów znormalizowanych)
- Pozycja 2 - Symbol GJ, w którym litera G oznacza materiał odlewany, a J oznacza żeliwo.
- Pozycja 3 - Postać grafitu; L – płatkowy, S – kulkowy, V – wermikularny, M - grafit żarzenia, N – brak grafitu (w strukturze występuje ledeburyt), Y – specjalny kształt grafitu ustalony w odpowiedniej normie.
- Pozycja 4 - mikrostruktura osnowy; A – austenit, F – ferryt, P – perlit, M – martenzyt, L – ledeburyt, Q – stan po hartowaniu, T – stan po hartowaniu i odpuszczeniu, B – przełom czarny (tylko dla żeliwa ciągliwego), W – przełom biały (tylko dla żeliwa ciągliwego).
- Pozycja 5 - wykorzystuje się ją do klasyfikacji żeliwa albo wg własności mechanicznych albo składu chemicznego.

Klasyfikacja wg własności mechanicznych

Używa się liczb odpowiadających własnościom mechanicznym oraz liter odnoszących się do metody wykonywania wlewka, przy czym S oznacza wlewek próbny odlewany oddzielnie, U – wlewek próbny przyłany, C – wlewek próbny wzięty z odlewu.

- Oznaczanie wg wytrzymałości na rozciąganie

Wytrzymałość na rozciąganie należy oznaczyć za pomocą minimalnej wartości dla danego gatunku w niutonach na milimetr kwadratowy ($1\text{N/mm}^2 = 1\text{MPa}$) np. EN-GJ-150C; EN-GJ-150S; EN-GJ-400U.

- Oznaczanie wg wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia

Jeżeli jest wymagane podanie wydłużenia, to powinno ono zostać oznaczone w procentach odpowiednią minimalną wartością dla danego gatunku, oddzieloną od minimalnej wytrzymałości na rozciąganie poziomą kreską, np.:

EN-GJ-350-22C;

EN-GJMW-450-7S;

EN-GJ-350-22U.

- Oznaczanie wg wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia i udarności

Jeżeli wymagane jest podanie udarności, to należy podać temperaturę przy której była wyznaczona jej wartość, przy czym RT oznacza temperaturę pokojową, a LT temperaturę niską. Litery te powinny być oddzielone poziomą kreską od liczb wskazujących własności mechaniczne, np.:

EN-GJ-400-18S-RT;

EN-GJS-350-22U-LT.

- Oznaczanie wg twardości

W przypadku gdy żeliwo oznaczane jest na podstawie twardości, w poz. 5 należy podać jeden z następujących symboli:

- HB dla twardości Brinella;

- HV dla twardości Vickersa;

- HR dla twardości Rockwella.

Po tych literach powinny następować dwie lub trzy cyfry odpowiadające twardości, np.: EN-GJL-HB155;

EN-GJS-HB230;

EN-GJN-HV350.

Klasyfikacja żeliw wg składu chemicznego

W przypadku oznaczania żeliwa według jego składu chemicznego pierwszym symbolem w pozycji 5 jest litera X. Pozostałe symbole w pozycji 5 powinny być następujące.

- Klasyfikacja bez podania zawartości węgla.

Po literze X powinny następować symbole chemiczne istotnych pierwiastków stopowych w procentach, w kolejności malejącej zawartości tych pierwiastków, przy czym zawartości zaokrągla się do liczby całkowitej, np.:

EN-GJL-X Ni Mn 13-7,

- Klasyfikacja z podaniem zawartości węgla.

Jeżeli wymagane jest podanie zawartości węgla, to powinna ona zostać wyrażona liczbą równą 100-krotnej procentowej zawartości węgla (np. 300 dla 3%), następującą po literze X. Wszystkie inne oznaczenia powinny być zgodne z poprzednim punktem, np.

EN-GJN-X300 Cr Ni Si 9-5-2.

Pozycja 6 - jeżeli jest potrzebne wskazanie wymagań dodatkowych, to w pozycji 6 umieszcza się następujące litery: D – odlew rurowy; H – odlew po obróbce cieplnej; W – spawalność dla złączy spawalnych (EN-1559-1:1997), Z – wymagania dodatkowe podane w zamówieniu, np.:

EN-GJMW-360-12S-W

Przy oznaczaniu żeliw na podstawie cyfr i liter każdemu gatunkowi żeliwa odpowiada tylko jedno oznaczenie. Oznaczenie powinno obejmować dziewięć znaków, zgodnie z tabelą:

Pozycja	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Znak	E	N	-	L	L	n	n	n	n

gdzie: L – duże litery; n – cyfra arabska.

Zgodnie z powyższym trzy pierwsze pozycje to litery EN oraz pauza czyli EN-. W czwartej pozycji ma być litera J oznaczająca żeliwo, w piątej – odpowiednia litera oznaczająca postać grafitu (litery podane wcześniej przy opisie oznaczania żeliw na podstawie symboli). W szóstej pozycji należy wstawić cyfrę charakteryzującą podstawowe własności żeliwa: wytrzymałość na rozciąganie, twardość a nawet skład chemiczny. Pozycję 7 i 8 zajmuje 2-cyfrowy znak od 00 do 99, charakteryzujący dany materiał. Pozycja dziewiąta to 1-cyfrowy znak, charakteryzujący specjalne wymagania danego materiału (patrz tablica 7 w PN-EN 1560:2001).