

### Oppgave 6.1

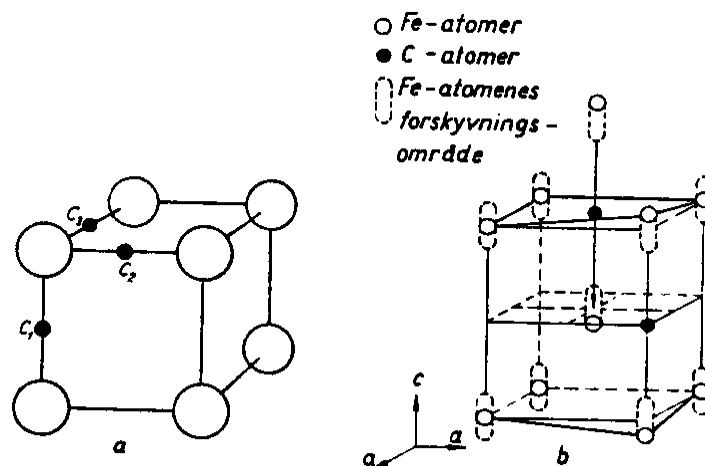
- a) Forklar kort hvilken varmebehandling som kan gi martensitt. Hvilken rolle spiller diffusjon under martensittbildningen? Vis med en figur både gitterstruktur og mikrostruktur av martensitt i karbonstål med 0,8% C. Kommenter strekfasthet, flytegrense og duktilitet i denne martensitten.

Skal vi få dannet martensitt må vi først austenittisere stålet ved å gløde det over  $A_3$ . Denne prosessen er diffusjonskontrollert og glødingen må derfor foregå over et visst tidsrom.

Når stålet så avkjøles fra austenittområdet igjen, får vi vanligvis dannet perlit.

Dannelsen av denne strukturen foregår ved diffusjon, og den må derfor ta tid. Hvis vi imidlertid avkjøler stålet så raskt fra austenittområdet at diffusjonen ikke får tid til å finne sted, tvinges austenittvandlingen ned til en lavere temperatur, og her omdannes austenitten til martensitt.

Martensitt kan oppfattes som ferritt som er overmettet på karbon, og martensittbildningen er først og fremst karakterisert ved at den er uavhengig av diffusjon. Gitterstrukturen i martensitt er vist i Figuren under. Ved lave C innhold, under ca. 0,2%, plasserer C atomene seg tilfeldig langs de tre aksene i gitteret, Figur a). Ved høyere C innhold inntar C atomene fortrinnsvis stillingene langs en av aksene, Figur b), og vi får en sterk fortrekning av gitteret. Strukturen blir således mer eller mindre tetragonal.



Figur L-6.1.1

Gitterstruktur i martensitt

a) Ved lave C innhold, under ca. 0,2%. b) Ved større C innhold.

De enkelte martensittkornene er plateformete krystaller. Strukturen i det nedkjølte materialet består i tillegg også alltid av noe restaustenitt, da omdannelsen er ufullstendig.

Strekfasthet og flytegrense for et stål med martensittisk struktur kan ikke måles på vanlig måte med en prøvestav. Dette skyldes at staven bryr seg som følge av elastiske spenningskonsentrasjoner. Disse kan skrive seg fra ubetydelige slipemerker på stavoverflaten, eller fra innspenningen av prøvestaven.

Duktiliteten uttrykt som forlengelse eller kontraksjon av en prøvestav, er for liten til at den i det hele tatt kan måles.

Fastheten av martensitt blir derfor angitt som hardhet, og duktiliteten som slagseighet.

**Oppgave 6.1, forts.**

b) Hvordan bestemmes IT-diagrammet eksperimentelt?

Når vi skal bestemme I-T diagrammet for et stål, lager vi først mange små prøvestykker av materialet. Disse blir så austenittisert ved gløding over  $A_3$  - Hver prøve bringes så over i et saltbad med temperatur under  $A_1$ , prøvene bråkjøles derved fra austenittiseringstemperaturen til saltbadets temperatur. Prøvene holdes i saltbadet en bestemt tid, og bråkjøles deretter til romtemperatur. Ved hjelp av mikroskop bestemmer man så andelen av de ulike strukturbestanddelene i prøvestykkets mikrostruktur.

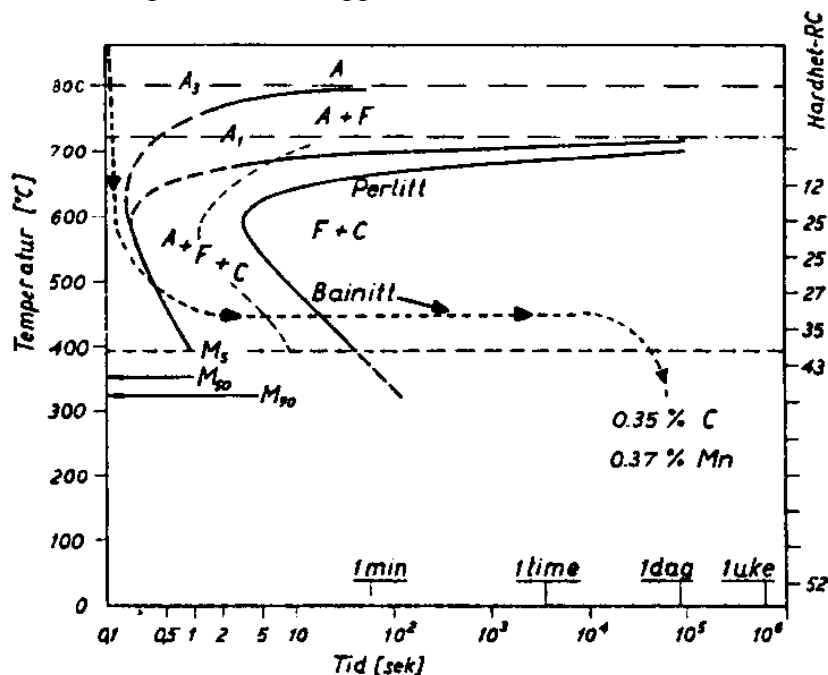
Dette blir så gjentatt med flere prøvestykker som, holdes i saltbadet i forskjellige tider. På denne måten får vi en oversikt over hvor fort austenittomvandlingen foregår ved den temperatur saltbadet holder, og hvilken struktur austenitten omvandles til.

Hele denne fremgangsmåten gjentas med flere prøvestykker, men denne gangen lar vi saltbadet holde en annen temperatur.

Når vi har utført dette med et tilstrekkelig antall prøvestykker, ved et tilstrekkelig antall forskjellige temperaturer, kan vi sette opp resultatene i form av et diagram hvor andelen av de ulike strukturelementene fremgår. Diagrammet har tid langs den ene aksene og temperatur langs den andre aksene, og det kalles et I-T diagram. I-T står her for Isothermal Transformation.

c) Tegn et tid-temperatur diagram for et underereutektoid stål og vis på dette hvordan bainitt dannes. Hvilke faser består bainitten av? Diskuter hardhet i bainitt sammenlignet med tilsvarende i martensitt.

På Figuren under er det stiplet inn et avkjølingsforløp som fører til dannelse av bainitt. Bainitt består av to faser, ferritt og cementitt. Begge disse fasene er overmettede.



Figur L-6.1. 2

I-T diagram for et underereutektoid stål med  $C = 0,35\%$  og  $Mn = 0,37\%$ .

**Oppgave 6.1c), forts.**

Da fasene i bainitt er mer finfordelte enn i perlitt og fasene er overmettede, er bainittdannelsen mindre avhengig av diffusjon enn perlittdannelsen, og den foregår således ved en lavere temperatur enn denne.

Fasene i bainitt er overmettede, og dette resulterer i en fortrekning av gitrene. Dislokasjoner har vanskeligheter med å passere slike gitre, og hardheten i bainitt er således høyere enn tilsvarende hos perlitt. Hos martensitt er gitteret enda mer fortrukket, og dislokasjonsvandringsvanskeligheten i enda større grad. Martensitt har tilsvarende større hardhet enn bainitt. Bainittens hardhet øker med avtagende omvandlingstemperatur.

d) Hvorfor er volumutvidelsen større ved omvandling fra austenitt til martensitt enn fra austenitt til ferritt?

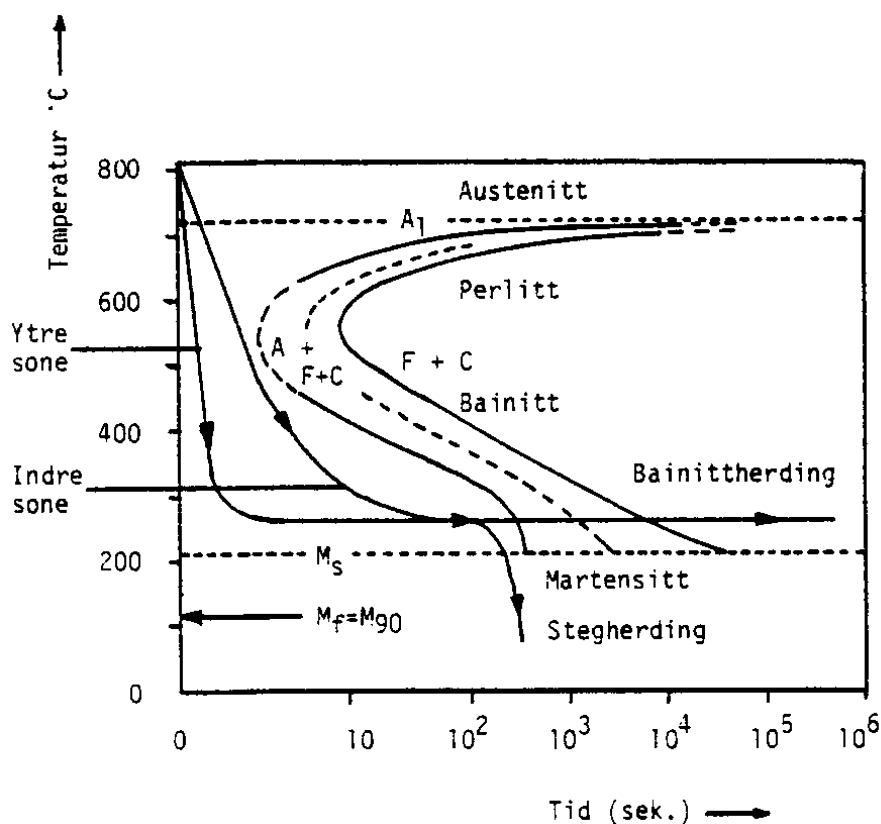
Austenittstrukturen er kubisk flatesentrert, og når denne omdannes til de kubisk romsentrerte strukturene ferritt og martensitt, øker volumet. Dette skyldes at den romsentrerte strukturen er mindre tettpakket og derfor tar større plass. Plasseringen av karbonatomene i martensitten forårsaker en kraftig fortrekning av gitteret, og volumutvidelsen blir derfor større her enn ved omvandling til ferritt.

## Oppgave 6.2

- a) Tegn IT diagram for et eutektoid stål. Før på diagrammet strukturområdene og forklar ut fra diagrammet stegherding og bainittherding. Hva menes med  $M_s$  og  $M_f$  i diagrammet?

Avkjølingsforløpene ved stegherding og martensittherding er tegnet inn i I-T diagrammet i Når et materiale bråkjøles ved herding, avkjøles den ytre sonen av materialet mye hurtigere enn den indre, som vist i Figuren, og dette fører til forkastninger av arbeidsstykket, evt. brudd, og de forsøkes derfor redusert. Dette kan gjøres ved stegherding, da bråkjøler vi til noe over  $M_s$  temperaturen, holder arbeidsstykket her til en temperaturutjevning har funnet sted, og bråkjøler til slutt til normal temperatur.

Strukturen er nå blitt martensittisk, se Figur.



Figur L-6.2

I-T diagram for et stål med 0,89% C og 0,3% Mn. A = Austenitt, C = Cementitt, F = Ferritt og  $A_1=723^\circ\text{C}$

Ved bainittherding holder vi materialet litt over  $M_s$  temperaturen til vi har fått dannet bainitt, og avkjøler deretter rolig til romtemperatur. Strukturen blir da bainittisk, se Figur.

$M_s$  betegner temperaturen for begynnelende martensittdannelse, denne temperaturen er avhengig av stålets C-innhold.

$M_f$  betegner temperaturen for avsluttet martensittdannelse. I praksis er det alltid noe restaustenitt og  $M_f$  betegner derfor vanligvis temperaturen hvor vi har fått dannet 90% martensitt.

- b) Forklar hva vi mener med restaustenitt i forbindelse med dannelsen av martensitt. Hva influerer på mengden av denne?

Omvandlingen fra austenitt til martensitt er alltid ufullstendig, slik at det i et herdet materiale finnes en del restaustenitt.

Martensittkrystallene vokser fram med meget stor hastighet når den austenittiske strukturens temperatur synker under  $M_s$ . Til en bestemt dannelsesstemperatur svarer alltid en bestemt mengde martensitt.  $M_s$  temperaturen senkes med økende innhold av karbon og andre legeringselementer. Når omvandlingen til martensitt på denne måten blir tvunget ned til en temperatur under  $200^\circ\text{C}$ , foregår den tregt, og strukturen inneholder mye restaustenitt etter bråkjølingen.

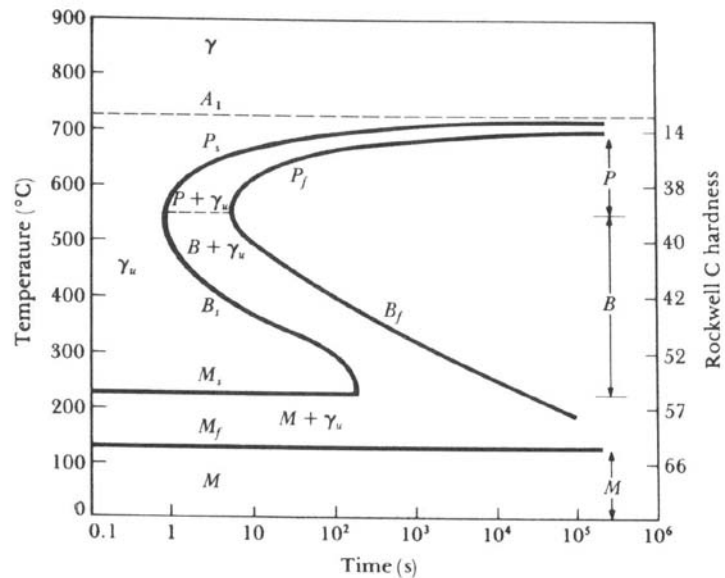
### Oppgave 6.3

Figuren under viser et I-T diagram for et eutektoid stål.

Det skal produseres et stål med hardhet HRC 32 ved isothermisk omdannelse.

Beskriv en komplett varmebehandling trinn for trinn, og mikrostrukturen etter hvert trinn.

1. Austenittiserer over  $727^{\circ}\text{C}$ .  
Holdetid ca. 1h.  
Stålet inneholder 100% austenitt.
2. Bråkjøler (f.eks. i saltbad) til  $650^{\circ}\text{C}$ . Holdetid 50s minimum.  
Etter 5s starter perlitt-dannelsen fra den ustabile austenitten.  
Perlitt vokser, og etter 50s består mikrostrukturen av 100% perlitt. Perlitten har middels finhet.  
(NB! Vi returnerer til tid  $T = 0\text{s}$ , når vi bråkjøler.)
3. Avkjøl i luft til værelsestemperatur.  
Mikrostrukturen forblir 100% perlitt.



Figur L-6.3  
I-T diagram for eutektoid stål.

### Oppgave 6.4

Bainitt har en veldig god kombinasjon av hardhet, fasthet og seighet.

I en bedrift ble eutektoid stål austenittisert ved  $750^{\circ}\text{C}$ , bråkjølt og holdt ved  $250^{\circ}\text{C}$  i 15min. Stålet ble til slutt avkjølt til værelsestemperatur. I-T diagram som i oppgave 6.3.

a) Ble resultatet bainittisk stål ved denne prosessen?

Fra I-T diagrammet for eutektoid stål (oppgave 6.3):

Oppvarming til  $750^{\circ}\text{C}$  gir 100% austenitt.

Etter bråkjøling til  $250^{\circ}\text{C}$  forblir stålet ustabil austenittisk i over 100s før fin bainitt begynner å vokse.

Etter 15min., eller 900s, har 50% fin bainitt blitt omdannet. Resten er fortsatt ustabil austenitt.

Denne austenitten omdannes ved videre avkjøling til værelsestemperatur, til martensitt.

Den endelige strukturen består derfor av bainitt (ca. 50%) og hard og sprø martensitt (ca. 50%).

b) Begrunn svaret.

Varmebehandlingen var altså ikke vellykket.

Holdetiden ved  $250^{\circ}\text{C}$  skulle minst ha hvert  $10^4\text{s}$ , eller ca. 3h.

**Oppgave 6.5**

Et stål med 0,4% C blir varmet opp til 740°C og bråkjølt. Ved bråkjøling omdannes austenitt til martensitt. Bestem sammensetning og mengde av martensitten som blir omdannet.

Fra Fe-C fasediagrammet:

Når stålet varmes opp til 740°C, består det av en blanding av ferritt og austenitt (2 faser).

Sammensetning austenitt = sammensetning martensitt = Fe + 0,68% C

% martensitt = % austenitt

Vi bruker hevarmloven.

$$1 \rightarrow \alpha(0,40 - 0,02) - \gamma(0,68 - 0,40) = 0$$

$$2 \rightarrow \alpha + \gamma = 1[100\%]$$

$$(1 - \gamma)(0,40 - 0,02) - \gamma(0,68 - 0,40) = 0$$

$$\gamma(0,68 - 0,02) = (0,40 - 0,02)$$

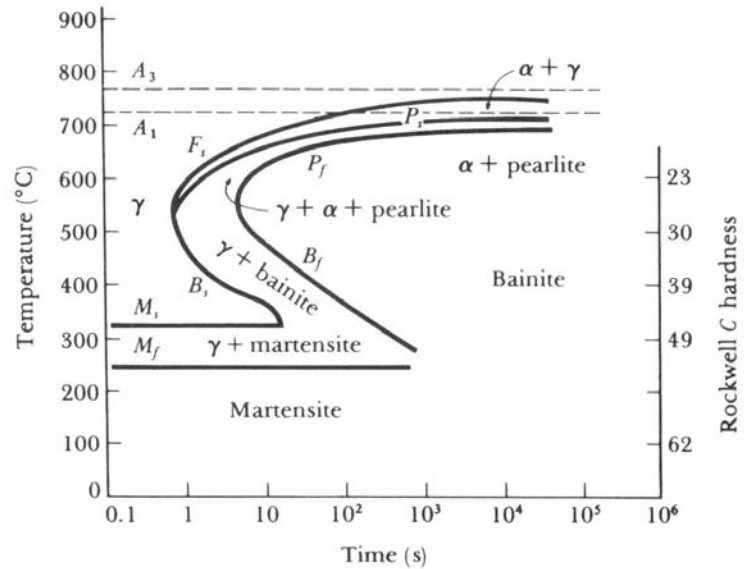
$$\gamma = \frac{0,40 - 0,02}{0,68 - 0,02} \times 100\% = \underline{\underline{58\%}}$$

% martensitt = 58%

**Oppgave 6.6**

Figuren under viser I-T diagrammet for et stål med 0,5% C og 0,8% Mn

Stålet skal varmebehandles (isoterm omdannelse) til en hardhet HRC 23.  
Beskriv varmebehandlingen trinn for trinn og mengden av hver mikrostruktur etter hvert trinn.



Figur L-6.6

I-T diagram for stål med 0,5% C og 0,8% Mn.

1. Austenittiser ved  $755^{\circ}\text{C} + (30 \rightarrow 50^{\circ}\text{C}) = 785^{\circ}\text{C} \rightarrow 810^{\circ}\text{C}$ .  
Holdetid ca. 1h.  
Mikrostrukturen er 100% austenitt.
2. Bråkjøl (f.eks. i saltbad) til  $600^{\circ}\text{C}$ .  
Holdetid minimum 5s.  
Ferrittdannelsen starter etter ca. 1s fra den ustabile austenitten.  
Etter ca. 1,5s starter perlittdannelsen.  
Austenitten er fullstendig omdannet til ferritt og perlitt etter 5s.

Vi bruker hevarmloven:

$$1 \rightarrow \alpha(0,5 - 0,02) - P(0,8 - 0,5) = 0$$

$$2 \rightarrow \alpha + P = 1[100\%]$$

$$\alpha = \frac{0,8 - 0,5}{0,8 - 0,02} \times 100\% = \underline{\underline{38\%}}$$

$$P = \frac{0,5 - 0,02}{0,8 - 0,02} \times 100\% = \underline{\underline{62\%}}$$

3. Avkjøl i luft til værelsestemperatur.  
Mikrostrukturen forblir 38% ferritt + 62% perlitt.

**Oppgave 6.7**

Et stål med 0,5% C og 0,8% Mn varmes opp til 800°C og holdes ved denne temperaturen i 1h. Stålet blir så bråkjølt til 700°C og holdt der i 50s. Stålet blir videre bråkjølt til 400°C og holdt der i 20s. Til slutt bråkjøles til værelsestemperatur.

Stålets I-T diagram er vist i figuren i oppgave 6.6.

Hvordan blir stålets endelige mikrostruktur?

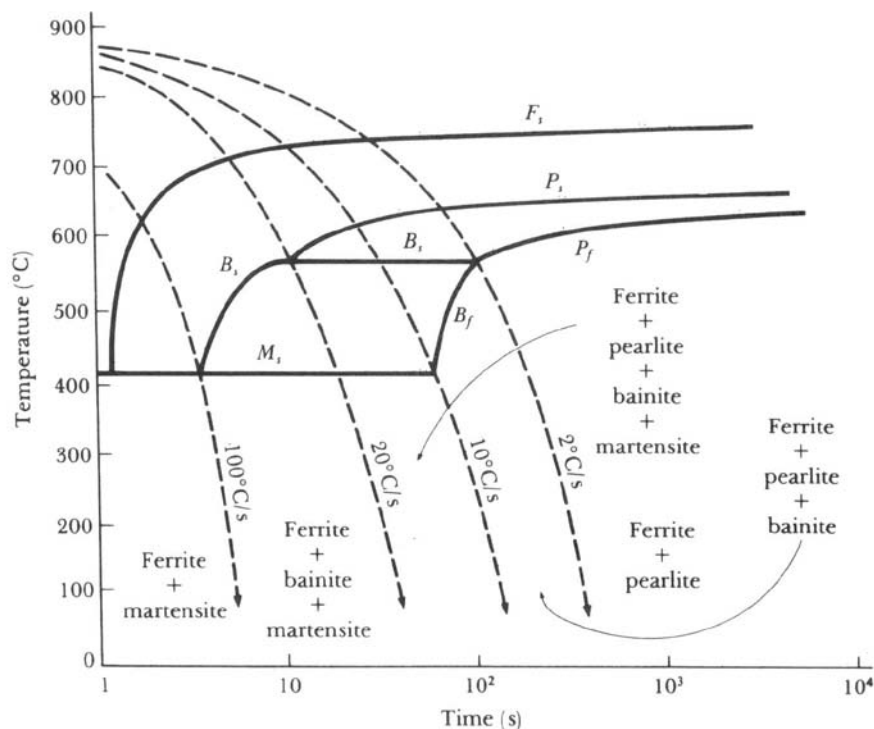
1. Etter 1h ved 800°C dannes 100% austenitt.
2. Ferrittdannelsen starter etter 20s ved 700°C fra den ustabile austenitten.  
Etter 50s inneholder stålet bare ferritt og ustabil austenitt.
3. Med en gang etter bråkjøling til 400°C består stålet fremdeles av ferritt og austenitt.  
Bainittdannelsen starter etter 3s. Etter 20s inneholder stålet ferritt, bainitt og fortsatt noe ustabil austenitt.
4. Etter bråkjøling til værelsestemperatur vil den gjenværende austenitten krysse  $M_s$  og  $M_f$  temperaturen, og omdannes til martensitt.

Den endelige mikrostrukturen består av ferritt, bainitt og noe martensitt.

**Oppgave 6.8**

Et stål med 0,2% C og 0,5% Mn (AISI 1020) avkjøles med en hastighet på 8°C/s i olje og 50°C/s når avkjølt i vann.

Figuren under viser C-T diagrammet for stål AISI 1020.



Figur L-6.8  
C-T diagram for stål AISI 1020.

Hvilke mikrostrukturer får vi ved avkjøling i olje, henholdsvis i vann?

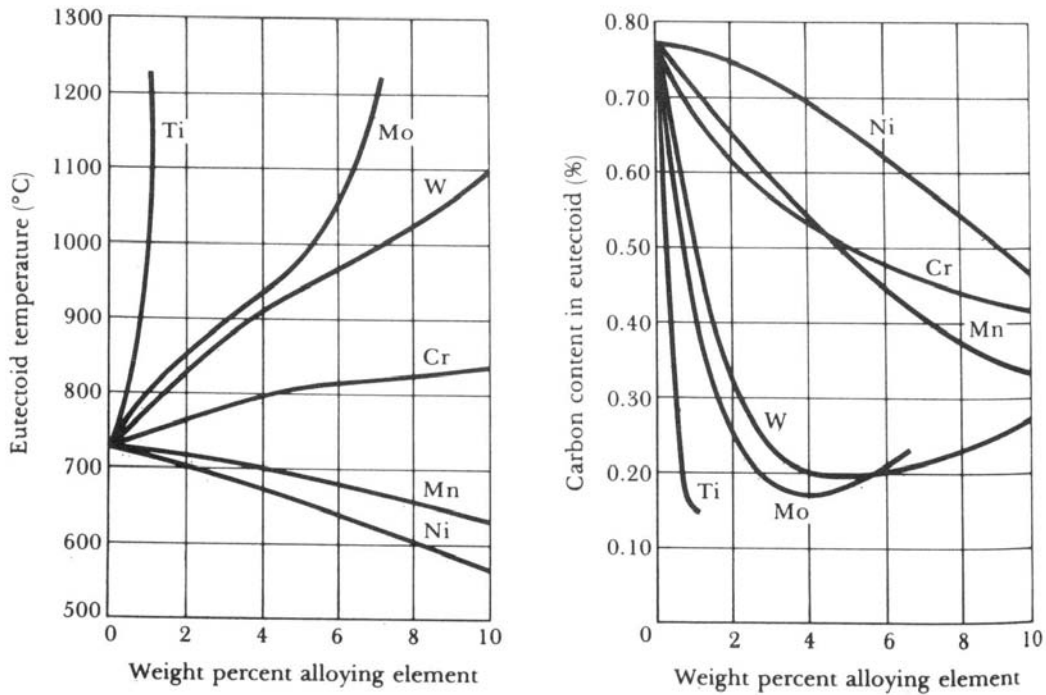
8°C/s : Ferritt + perlit + bainitt (+ evt. restaustenitt)

50°C/s : Ferritt + bainitt + martensitt (+ evt. restaustenitt)



## Oppgave 6.9

Figuren under viser effekten av noen legeringselementer på eutektoid temperatur og %C i eutektoid.



Figur L-6.9

Effekt av legeringselementer på eutektoid temperatur.

Et AISI 1060 stål med 0,6%C og 0,7%Mn, kan spenningsglødes ved 700°C.

Som en følge av denne varmebehandlingen, blir stålet mykere og effekten fra tidligere kaldbearbeiding blir eliminert.

Anta at et stål som inneholder 0,6%C og 8%Ni blir gitt den samme varmebehandlingen.

a) Beskriv strukturen og diskuter om varmebehandlingen er egnet for dette Ni stålet.

I Ni-stålet er C-innholdet i eutektoid 0,54% og  $A_1$  temperaturen er 600°C.

Hvis dette stålet varmes opp til 700°C og holdes der en stund, vil det dannes austenitt.

Ni-stålet er overeutektoid (mens AISI 1060 stålet er undereutektoid). Etter avkjøling fra varmebehandlingstemperaturen, vil cementitt kunne dannes på korn grensene til perlitten.

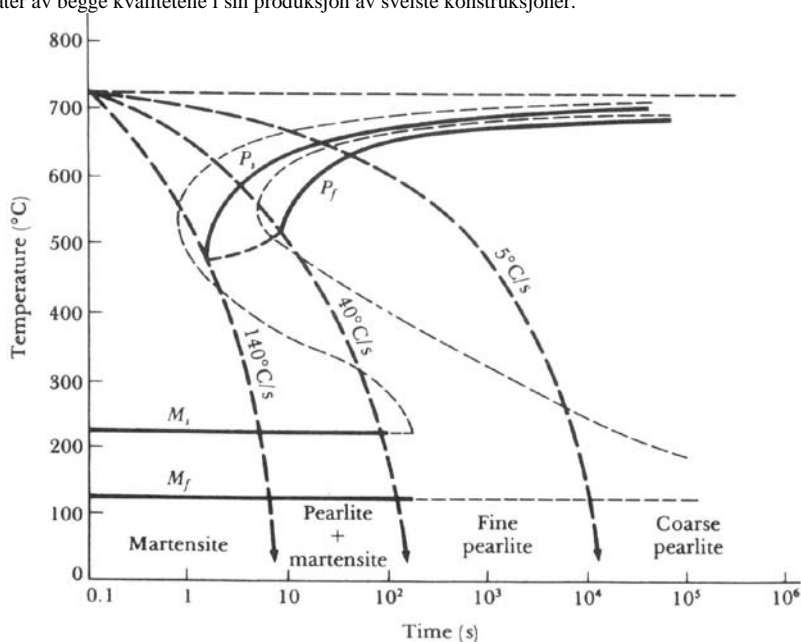
Dette vil føre til et sprøere stål.

### Oppgave 6.10

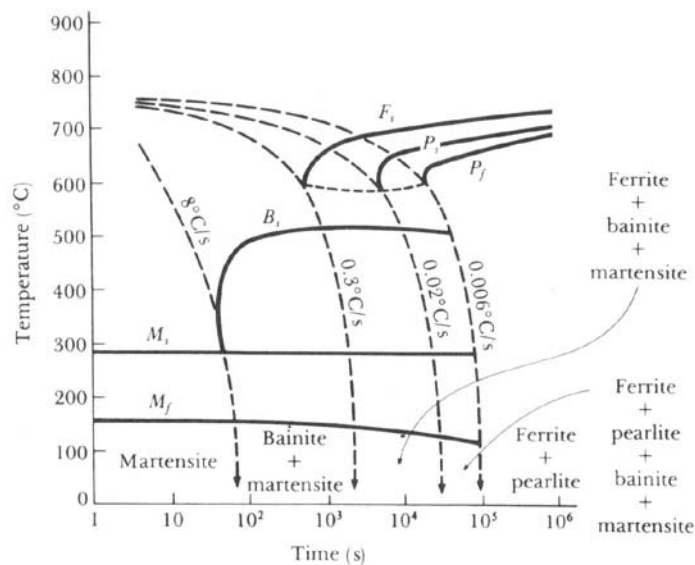
Figuren under viser C-T diagrammer for stålene AISI 1080 med 0,8% C og 0,7% Mn, og AISI 4340 med 0,4% C, 0,7% Mn, 0,2% Si, 2% Ni, 0,8% Cr og 0,2% Mo.

En bedrift vurderer å benytte stålplater av begge kvalitetene i sin produksjon av sveiste konstruksjoner.

AISI 1080:



AISI 4340:



Figur L-6.10  
C-T diagrammer.

Sammenlign strukturen i varmpåvirket sone i plater sveist i stål AISI 1080 og i stål AISI 4340, hvis avkjølingshastigheten er 5<sup>0</sup>C/s.

Fra C-T diagrammene får vi følgende strukturer:

AISI 1080 : 100% perlitt

AISI 4340 : Bainitt og martensitt

Herdbarheten til det legerete (AISI 4340) stålet er mye større enn til det ulegerete (AISI 1080) stålet.

Sveisbarheten reduseres.

Martensittdannelse fører til sprøtt materiale.

Sprøtt materiale kan føre til sprekkdannelse p.g.a. indre spenninger i materialet etter sveising.