

8 AVSPENNING, REKRYSTALLISASJON og KORNVEKST

(Recovery, recrystallization and grain growth)

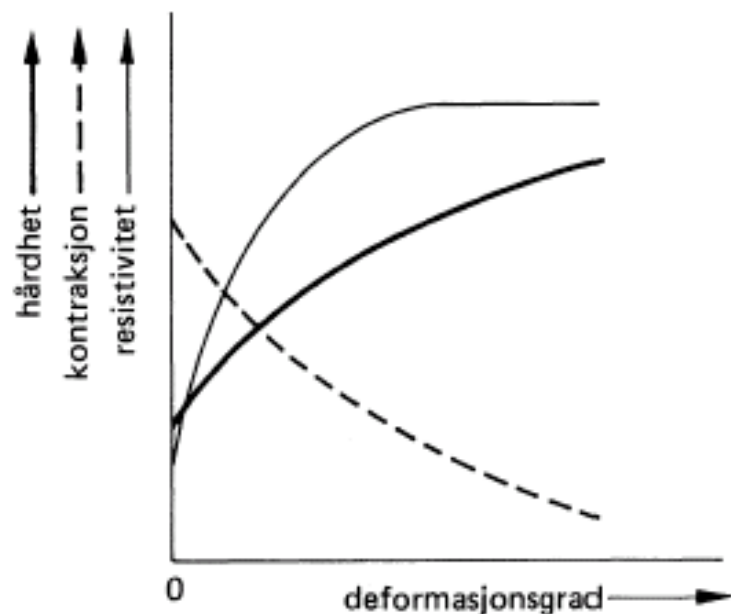
Etter plastisk deformasjon av materialet i kald tilstand øker hardhet og flytegrense. Kontraksjonen og duktiliteten (seigheten) faller. Se figuren under.

Deformasjonen skjer her ved kaldtrekking av en tråd. Kald er et relativt begrep og forutsetter at temperaturen er under 0,3 ganger smeltetemperaturen i grader K (Kelvin).

Også fysikalske egenskaper påvirkes. Resistiviteten (elektrisk motstandsevne) øker drastisk selv ved lav deformasjonsgrad.

Tilsvarende vil konduktiviteten (elektrisk ledningsevne) falle drastisk.

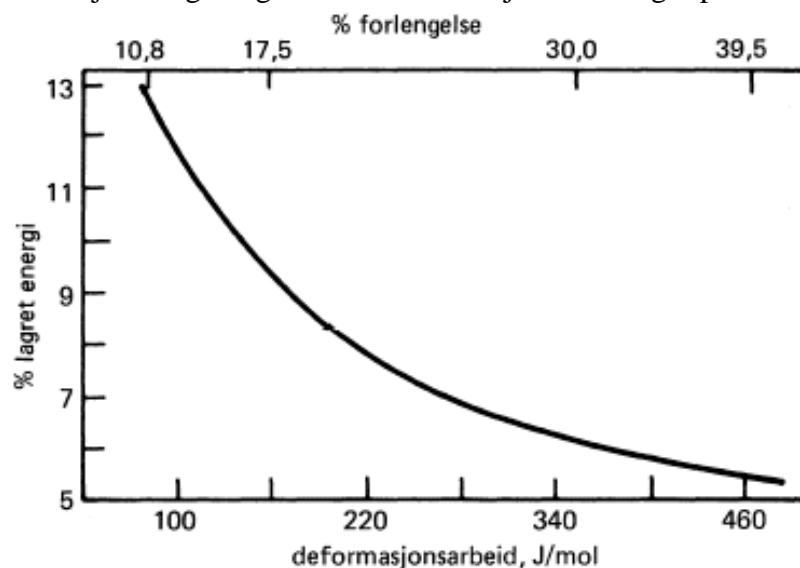
Det kan også spores en mindre reduksjon av densiteten (tettheten).



Figur 8.1

Forandring av mekaniske egenskaper i metalliske materialer ved trekking.

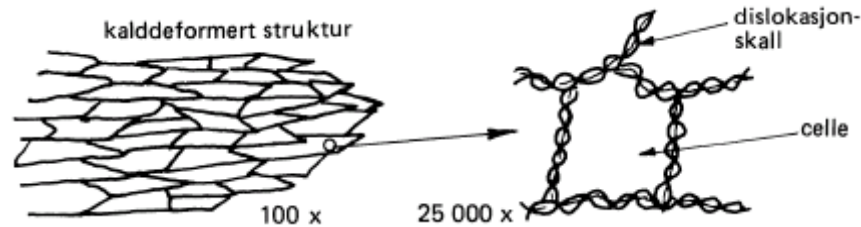
Når et metallisk materiale kalddeformeres, omgjøres størstedelen av deformasjonsarbeidet i varme. En mindre del, 5 – 10 %, blir lagret som elastisk energi og er først og fremst knyttet til økningen av dislokasjonslengde og vakanskonsentrasjon som følger plastisk deformasjon.



Figur 8.2

Lagret energi i en strekkstav.

Gjennomgående fordeler ikke dislokasjonene seg jevnt i strukturen, men samler seg i diffuse skall. Disse skallene avgrensner celler, også kalt subbkorn, innenfor hvilke strukturen på det nærmeste er dislokasjonsfri. Det kan være opp til millioner celler innenfor hvert korn. Den krystallografiske orientering vil variere noe fra celle til celle.



Figur 8.3

Etter kalddeformasjon er dislokasjonene samlet i diffuse skall som avgrensner celler eller subbkorn med dislokasjonsfri struktur.

Skallene som omgir cellene, er områder av høy tetthet av kryssende og for en stor del ubevegelige dislokasjoner. Flytespenningen i materialet er derfor høy, og i lokale områder hvor atomplanglidning ikke kan finne sted, vil fortsatt deformasjon resultere i sprekker. Dette reflekteres i en synkende duktilitet i materialet som vist i den første figuren.

Økningen av resistiviteten (elektrisk motstandsevne) skyldes først og fremst at kalddeformasjon øker antallet vakanser og andre punktfeil. De dannes når kryssende dislokasjoner presses forbi hverandre. Punktfeil bevirker spredning av elektronstrømmen i en leder, og dette gjenspeiles i en redusert konduktivitet (elektrisk ledningsevne). De egenskaper som er påført materialet ved deformasjonen er bemerkelsesverdig stabile ved normal temperatur. Ved en varmebehandling (gløding) etter endt deformasjon, kan de termiske vibrasjoner som oppstår i materialet føre til vakans- og dislokasjonsvandring og diffusjon. Dette fører igjen til en ny reorganisering av strukturen.

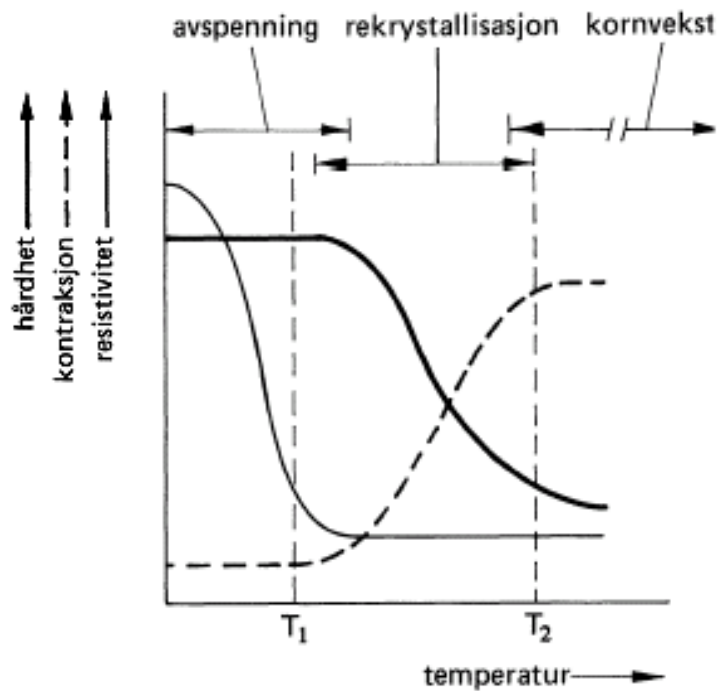
La oss foreta en varmebehandling ved forskjellige temperaturer av metalltråden i den første figuren, etter at den er trukket til en bestemt reduksjonsgrad. Vi forutsetter foreløpig at glødetiden er konstant og lik en halv time.

Hardhet, kontraksjon og resistivitet måles etter endt gløding og avkjøling til normal temperatur. Figuren på neste side viser hvordan disse egenskaper varierer med glødetemperaturen.

Etter varmebehandling ved tilstrekkelig høy temperatur synes virkningen av kalddeformasjon å forsvinne. Egenskapene inntar verdier noenlunde tilsvarende før deformasjonen.

Kurvene i figuren antyder at glødingen, avhengig av den temperatur som benyttes, utløser tre ulike prosesser som kaldes:

- Avspenning
- Rekrystallisasjon
- Kornvekst



Figur 8.4

Ved gløding etter kalddeformasjon opptrer tre forskjellige prosesser: Avspenning, rekrystallisasjon og kornvekst.

8.1 Avspenning

Under denne prosessen, som foregår ved forholdsvis lav temperatur, skjer det en reduksjon av punktdefekter og en mindre reduksjon av dislokasjonskonsentrasjonen ved at dislokasjoner av motsatt fortegn tilintetgjør hverandre.

Avkjølt til normal temperatur etter avspenning er metallens (legerings) hardhet, flytegrense og duktilitet bare uvesentlig influert. Det kan heller ikke sees forandringer i kornstrukturen.

Derimot faller resistiviteten nesten til verdien før deformasjon. Dette viser at antallet punktdefekter og vakanser er sterkt nedsatt.

Videre kan vi ved forskjellige metoder oppdage at de indre spenninger i materialet er blitt redusert, hvorav også navnet avspenning.

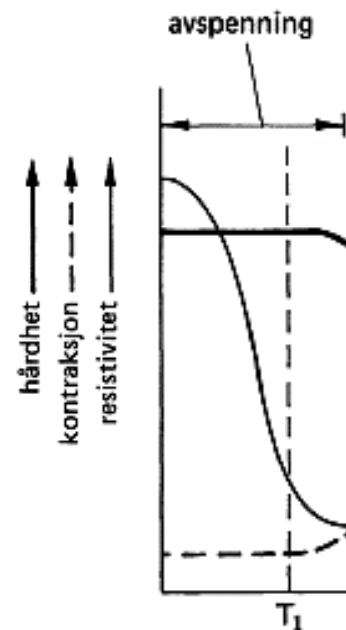
Indre spenninger er et uklart begrep. Både punktfeil og spesielt dislokasjoner fører til elastiske spenninger. Vanligvis prater vi om indre spenninger når strekk- eller trykkområdet strekker seg over et større antall korn i en polykrystallinsk struktur.

Over hele materialvolumet må strekk- og trykkspenninger balansere hverandre siden det ikke forutsettes ytre krefter. Indre spenninger kan oppstå under plastisk deformasjon, men like ofte som et resultat av temperaturgradienter under avkjøling etter støping eller varmebehandling.

Den reduksjon av indre spenninger som følger avspenning, henger sammen med at glidespenningen for operative dislokasjoner reduseres med temperaturen.

Når et arbeidsstykke med indre spenninger tilvirkes ved sponskjærende bearbeiding, ”kaster” det seg fordi balansen mellom trykk- og strekkspenninger forrykkes.

Indre spenninger kan også bevirke spenningskorrosjon i bestemte materialmiljø kombinasjoner. For å motvirke slike skader benyttes avspenningsgløding.



Figur 8.5
Avspenning.

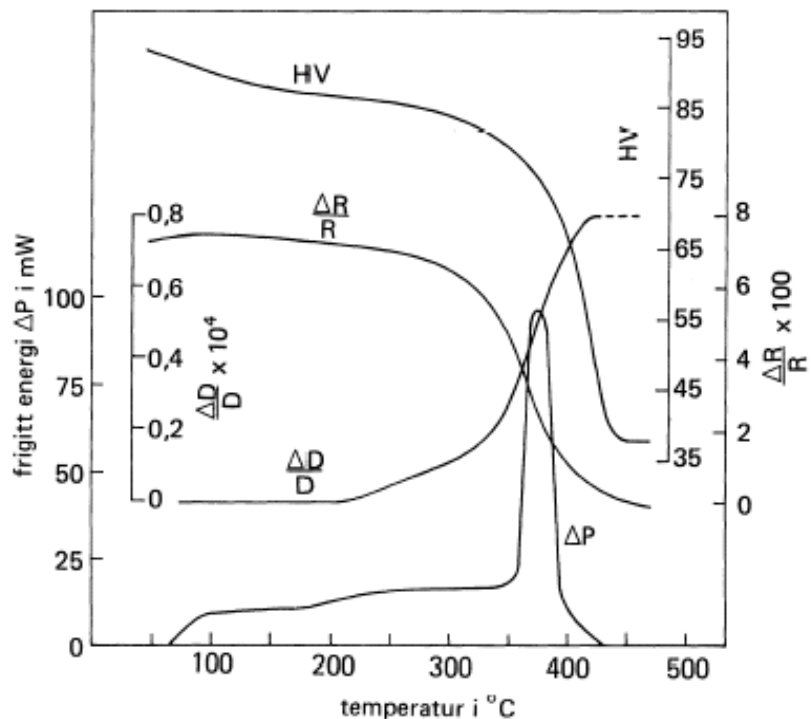
8.2 Rekrystallisasjon

Reduksjon og reorganisering av feilsteder under avspenning skjer innenfor de enkelte korn. Kornstrukturen med korngrenser slik den fremkommer i et lysmikroskop er ikke påvirket.

Figuren til høyre viser frigivelse av elastisk energi ΔP under varmebehandling av teknisk rent kobber etter 33 % strekkdeformasjon.

Figur 8.6
Frigitt energi ΔP under avspenning og rekrystallisasjon av kalddeformert teknisk kobber.

HV = Hardhet Vickers
 $\Delta D/D$ = forandring i relativ tetthet (densitet)
 $\Delta R/R$ = forandring i relativ resistivitet (elektrisk motstandsevne).



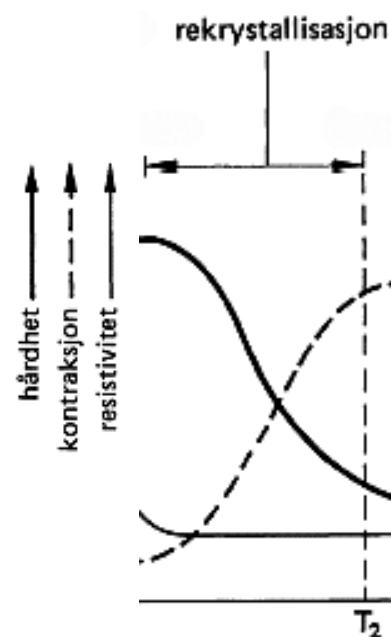
Det er en skarp stigning på kurven for ΔP ved 360°C , som kan vises metallografisk å svare til at en ny kornstruktur vokser frem. Denne prosessen kalles rekrystallisasjon.

Figuren viser også at rekrystallisasjon er forbundet med et markert fall i hardheten HV som var lite påvirket i avspenningsområdet. Forandringen av resistivitet og densitet fortsetter under rekrystallisasjonen.

Mekanismen ved rekrystallisasjon er at nye korn vokser ut fra stabile kim i den deformerte struktur. I denne strukturen er kornene langstrakte og inneholder et stort antall dislokasjoner.

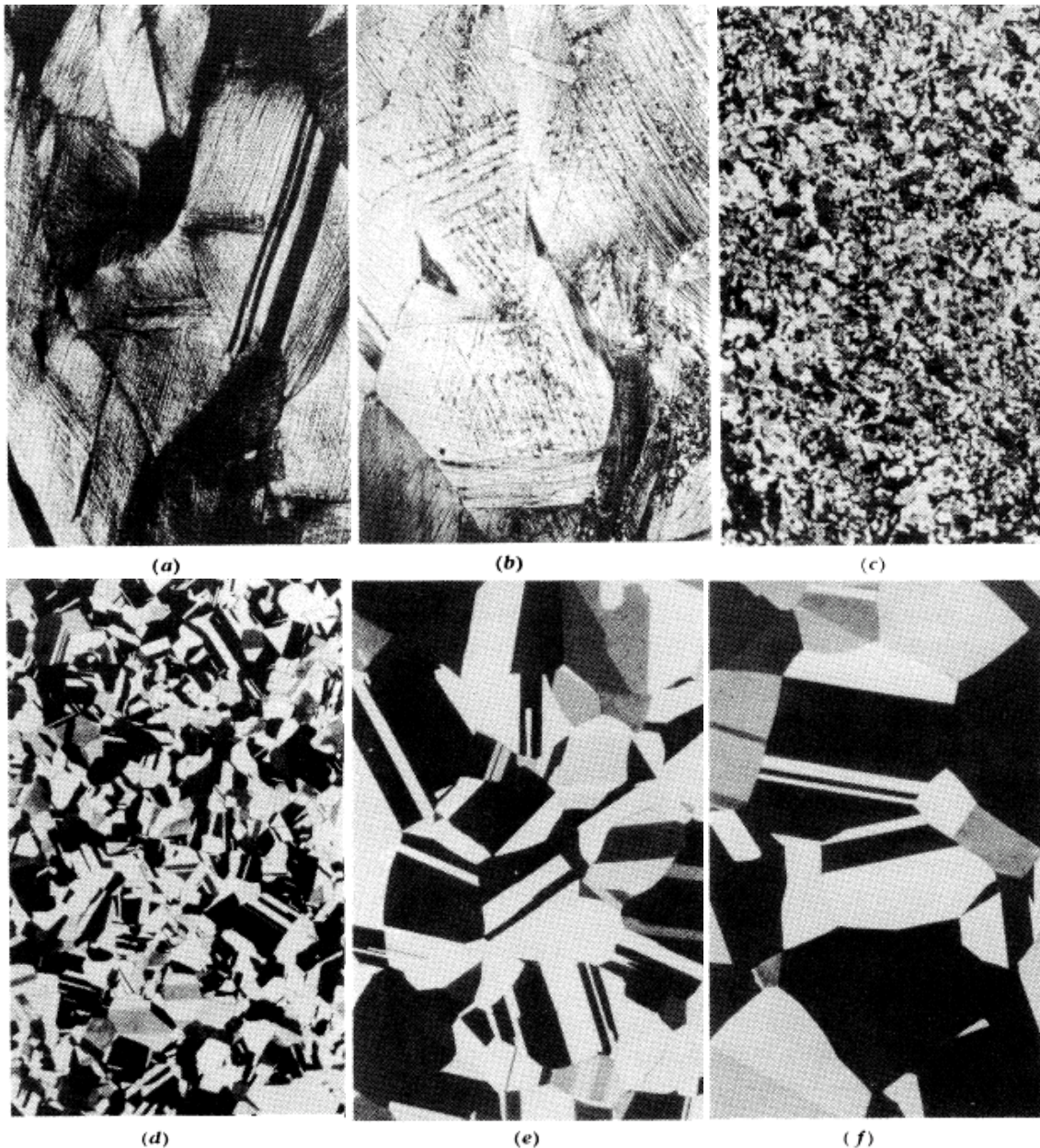
Mekanismen er veldig lik den som skjer når faste krystaller vokser frem av en smelte. Kimene dannes for det meste langs korngrensene, hvor deformasjonsgraden er størst, og hvor tendensen til reorganisering er sterkest. I de nye kornene ordner atomene seg slik at antall dislokasjoner blir omtrent det samme som før deformasjonen. Hvorfor nettopp det er stabilt, vet vi ikke.

Kornene vokser frem til de støter mot hverandre på en tilfeldig måte. Etter endt rekrystallisasjon har vi fått en ny kornstruktur av polyedrisk type.



Figur 8.7
Rekrystallisasjon.

Figuren under viser kornstrukturen i valset messing under rekrystallisasjon og kornvekst.



Figur 8.8

Rekrystallisasjon og kornvekst i valset messing. Forstørrelse 50x.

(a) Struktur etter 33 % kaldvalsing.

(b) Glødet ved 500°C i 3sekunder. Det er antydning til rekrystallasjon langs glidelinjer og korngrenser.

(c) Glødet ved 500°C i 4sekunder. Nesten fullført rekrystallasjon.

(d) Fullstendig rekrystallasjon og begynnende kornvekst.

(e) og (f) Kornvekst.

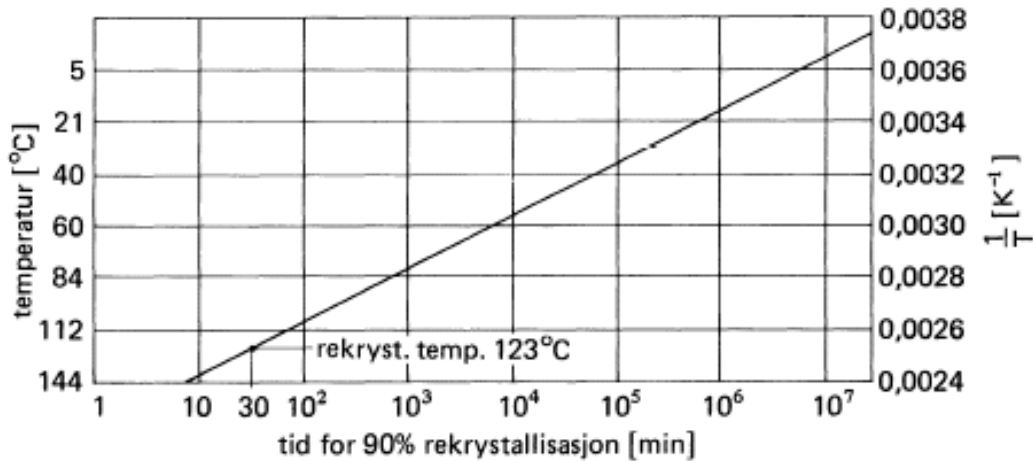
I den rekrystalliserte strukturen i figuren, har fasthetsegenskaper som flytegrense, hardhet og duktilitet (seighet) justert seg til nivået før deformasjonen.

De indre spenninger er blitt ytterligere redusert sammenlignet med størrelsen etter avspenning.

RekrySTALLISASJON er avhengig av glødetemperatur, glødetid, hvor mye materialet er kaldeformert og av mengden av legeringselementer.

8.2.1 Virkningen av glødetemperatur og glødetid.

Måler vi tiden til for eksempel 90 % rekrySTALLISERT struktur ved forskjellige glødetemperaturer, får vi en avhengighet som vist i figuren under for 99,999 % kobber, Cu.



Figur 8.9

Tid for 90 % rekrySTALLISASJON i 99,999 % Cu ved forskjellige temperaturer etter 98 % kaldvalsing.

Hastigheten på rekrySTALLISASJONEN er avhengig av flere delprosesser. Først og fremst av hastigheten ved dannelse av kimer og veksthastigheten av krystaller. Veksthastigheten av krystaller er igjen avhengig av diffusjonshastigheten langs kornrensene av vertsgitterets atomer.

Som figuren viser, er rekrySTALLISASJON avhengig av både temperatur og tid. Det er vanlig å definere rekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN som temperaturen for 90 % rekrySTALLISASJON i løpet av 30 minutter. I figuren over svarer dette til 123°C.

Vi kan også se at en variasjon av tiden mellom for eksempel 10 og 100 minutter gjør lite utslag i temperaturen. Vi kan derfor i praksis oppgi rekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN uten å nevne tiden.

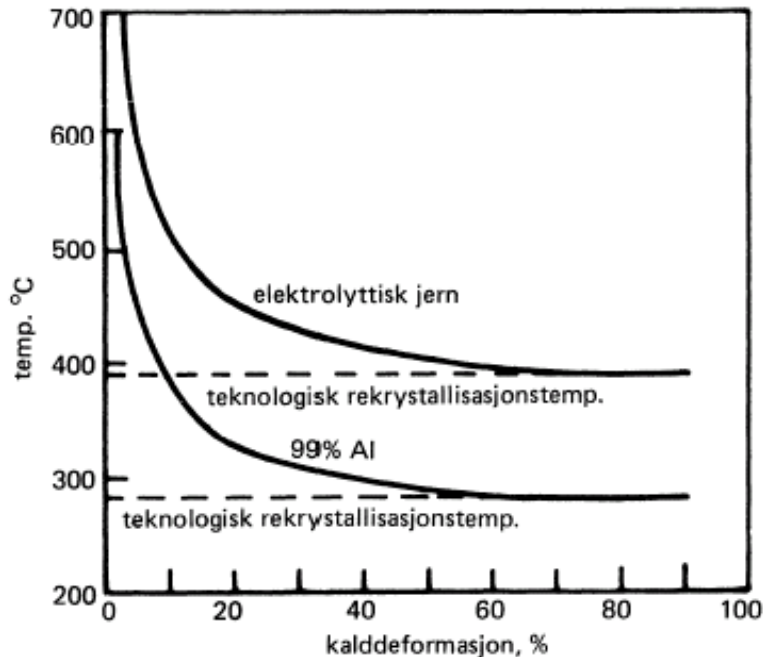
For rene metaller regner vi at rekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN er omtrent 0,4 ganger smeltetemperaturen målt i Kelvingrader.

8.2.2 Virkningen av kalddeformasjon.

Økt kalddeformasjon før rekrystallasjon øker mengden av lagret elastisk energi i materialet og dermed den drivende kraft ved rekrystallasjon.

Fra ca. 10% deformasjon er virkningen størst på kimdannelsehastigheten. Veksthastigheten av nye krystaller øker også.

Den endelige innflytelse på rekrystallasjonstemperaturen er vist i figuren under for 99% aluminium Al og elektrolyttisk jern Fe. Graden av kalddeformasjon er gitt som forlengelsen i en strekkstav.



Figur 8.10

Variasjon av rekrystallasjonstemperaturen med graden av kalddeformasjon i elektrolyttisk jern Fe og 99% aluminium Al.

Figuren viser at temperaturen nærmer seg en asymptotisk verdi når deformasjonsgraden overstiger 40 – 50%. Dette er den rekrystallasjonstemperaturen som vanligvis oppgis for teknologisk bruk.

De nye kornene vokser frem fra stabile kim, og veksten stanser først når kornene er blitt så store at de møter hverandre.

Størrelsen på de rekrystalliserte korn øker med veksthastigheten og faller med kimdannelsehastigheten.

Deformasjonsgraden før gløding virker på kimdannelsehastigheten. Økt deformasjonsgrad gir økt kimdannelsehastighet.

Konklusjon: Økende deformasjonsgrad reduserer kornstørrelsen.

Vanligvis er kornstørrelsen lite påvirket av glødetemperaturen.

8.2.3 Virkningen av legeringselementer.

Når små mengder elementer legeres inn i et rent metall og danner blandkrystaller med det, øker tiden for 90% rekrySTALLISASJON, eller rekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN stiger hvis vi velger å holde fast på en bestemt tid.

Vi kan vise at fremmedatomer så vel som fremmedpartikler virker som en bremse på grensene av de nye korn når de vokser frem. Virkningen er veldig synlig, se tabell.

| Materiale | | RekrySTALLISASJONSTEMPERATUR [C ⁰] |
|----------------|---------------------------------|--|
| kobber (Cu) | 99,999 % | 120 |
| | teknisk | 210 |
| | + 5 % Zn (sink) | 320 |
| aluminium (Al) | soneraffinert | 10 |
| | 99,999 % | 85 |
| | 99 % | 240 |
| | legeringer | 320 |
| nikkel (Ni) | 99,99 % | 370 |
| | 99,4 % | 630 |
| wolfram (W) | ”veldig rent” | 1200 - 1300 |
| | Med mikroporer | 1600 - 2300 |
| tinn (Sn) | teknisk | -4 |
| Jern (Fe) | elektrolyttisk | 400 |
| | 0,1 % C (karbon) | 500 - 600 |
| | 18 % Cr (krom), 8 % Ni (nikkel) | 800 - 900 |

Tabell 8.1

Virkningen av legeringselementer på rekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN.

Ren aluminium rekrySTALLISERER ved romtemperatur hvis prosessen gis tilstrekkelig tid. Dette er en hovedårsak til at aluminium ikke benyttes til elektriske ledninger i hus. Ledningene kan ikke festes med kontaktskruer til brytere, støpsler m.fl. på vanlig måte da metallet rekrySTALLISERER omkring skruen. Trykkraften mellom metall og skrue blir da borte, og kontaktmotstanden øker.

RekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN kan heves ved innlegering. Dette kan ikke godtas da innlegering i dette tilfellet vil øke resistiviteten (elektrisk motstandsevne) i ledningen.

8.3 Kornvekst

I den tidligere figuren som viser rekrystallasjon og kornvekst i 33% kaldvalset messing, så vi at ved gløding til 500°C i over 4 sekunder fikk vi kornvekst i messingen, figur (e) og (f).

Drivkraften i denne prosessen er at samlet grenseflateenergi i et volumelement i metallet reduseres når gjennomsnittlige kornstørrelse øker. Samlet korngrenseflate er mindre i en grov enn i en fin struktur.

Veksten skjer slik at de store korn utvider seg på bekostning av de små. Vanligvis ender vi opp med en struktur hvor alle korn er omtrent like store.

Under spesielle forhold opptrer unormal kornvekst som innebærer at bare enkelte korn vokser. Den endelige struktur består av veldig store korn og små korn.

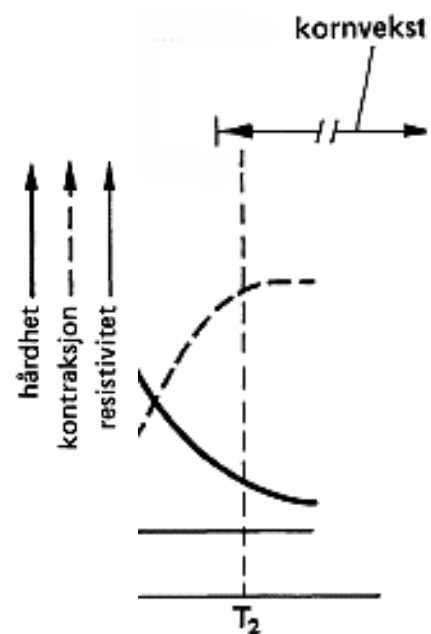
Kornvekst er ikke avhengig av forutgående plastisk deformasjon slik som rekrystallasjon. I prinsippet tenderer ethvert polykrystallinsk materiale mot en grovere struktur. Også her gjelder at prosessen er termisk aktivert: Den går raskere jo høyere temperaturen er.

De fasthetsmessige egenskaper av materialet forandres ved kornvekst. Gjennomgående regnes at en fin struktur gir den beste kombinasjon av egenskapene styrke og duktilitet (seighet), og at kornvekst bør unngås.

De tre prosessene avspenning, rekrystallasjon og kornvekst kan som vi har sett, ikke avgrenses til bestemte temperaturintervall eller til bestemte tidsintervall når temperaturen holdes konstant. De glir i over i hverandre i større eller mindre grad.

Den endelige kornstørrelse er heller ikke bare avhengig av det som skjer i den egentlige kornvekstperiode, men også av strukturen like etter rekrystallasjon og dermed av deformasjonsgraden.

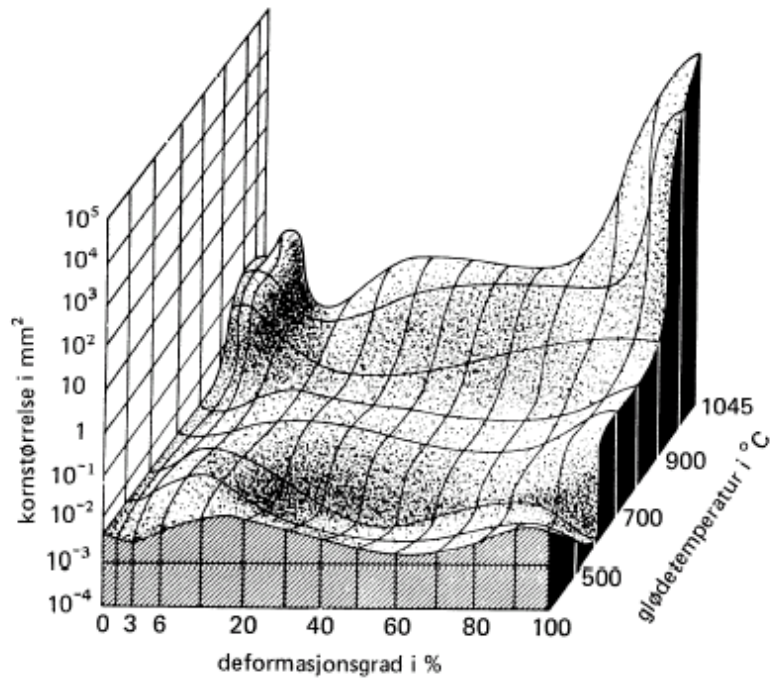
For praktisk bruk finnes diagrammer som viser sammenhengen mellom glødetemperatur, deformasjonsgrad og kornstørrelse ved en bestemt glødetid.



Figur 8.11
Kornvekst.

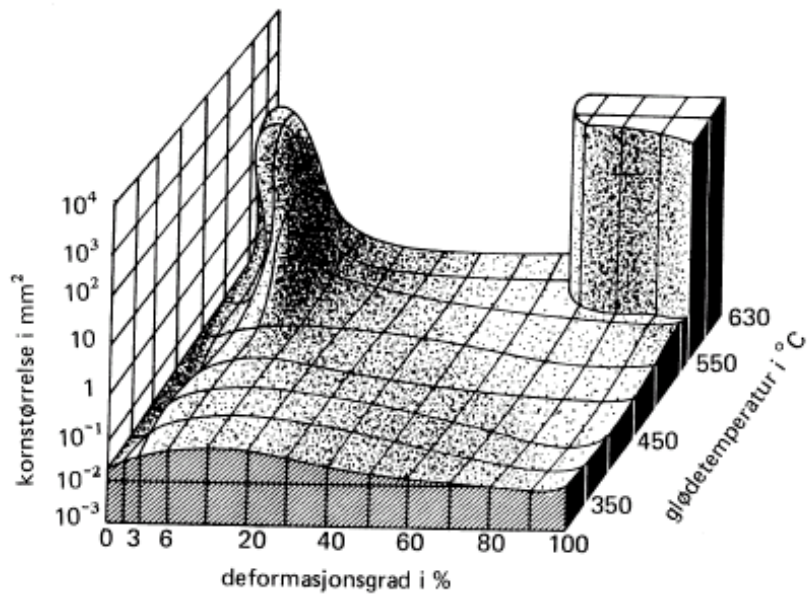
Figurene på neste side viser diagrammer for kobber Cu, aluminium Al og bløtt stål.

Figur 8.12
 Kornstørrelse ved
 rekrystallasjon av kobber
 Cu avhengig av
 deformasjons-grad og
 glødetemperatur. Glødetid
 er 30minutter.



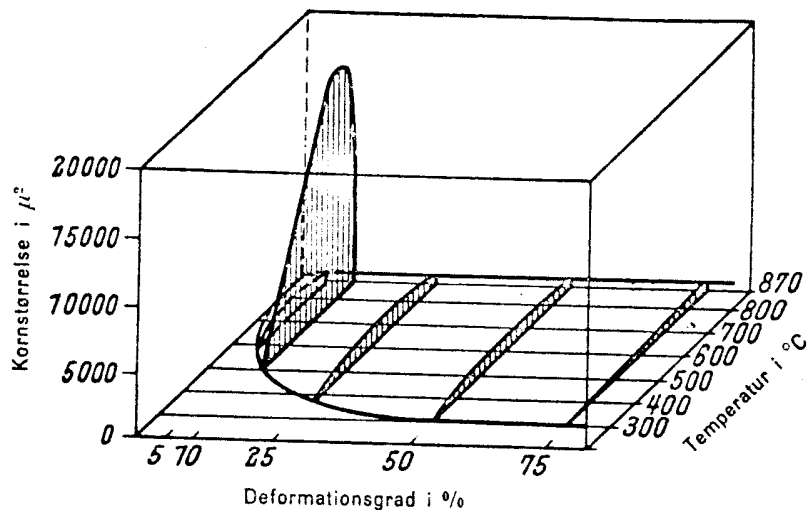
Gjennomgående finner vi en grov struktur ved lav deformasjonsgrad og høy temperatur, men også ofte ved høy temperatur og høy deformasjonsgrad.

Figur 8.13
 Kornstørrelse ved
 rekrystallasjon av ren
 aluminium Al avhengig av
 deformasjonsgrad og
 glødetemperatur. Glødetid
 er 30minutter.



For ulegert stål med lavt karboninnhold opptrer den grove struktur ved en kritisk deformasjonsgrad på ca. 10%. Denne søkes derfor unngått når materialet kalddeformeres, se figuren til høyre.

Figur 8.14
 Kornstørrelse ved
 rekrystallasjon av bløtt stål
 med ca. 0,1 % karbon
 avhengig av deformasjons-
 grad og glødetemperatur.
 Glødetid er 30minutter.



8.4 Rekrystalliserende gløding og varmebearbeiding

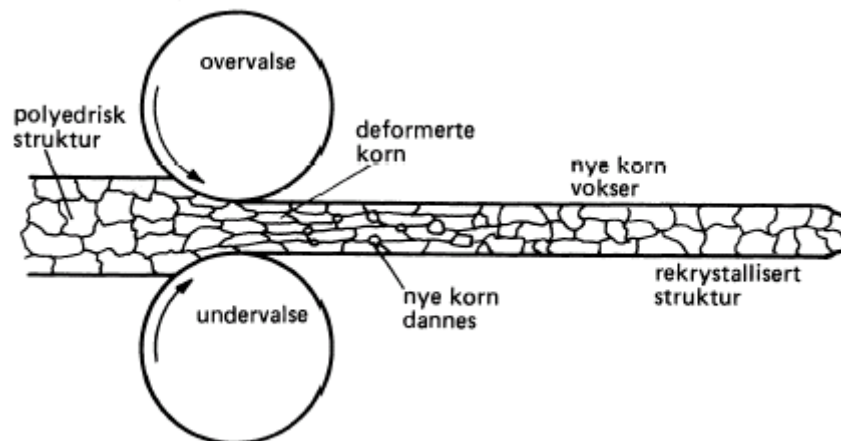
Rekrystalliserende gløding er en viktig teknologisk prosess som brukes når vi vil oppheve virkningen av kalddeformering på materialets styrke og duktilitet, eller på konduktiviteten når denne er av betydning.

Mest brukt i denne forbindelse er rekrystalliserende mellomgløding. Ved for eksempel kaldvalsing av plater følger en slik gløding etter et mindre antall valsestikk. Uten mellomgløding vil platen sprekke hvis nedvalsingen fortsetter.

Varmebearbeiding er plastisk forming godt over rekrystallisasjonstemperaturen. Rekrystallisasjon skjer da samtidig med eller umiddelbart etter hvert formingstrinn, se figuren under, og teoretisk er det da ingen grense for hvor stor grad av deformasjon emnet kan tåle uten at det opptrer sprekker og uten at deformasjonsmotstanden øker.

Vi må sørge for at formingstemperaturen er så høy at rekrystallisasjonen fullbringes i løpet av den tiden som står til disposisjon mellom hvert formingstrinn, for eksempel mellom hvert valsestikk i figuren. Dette kan dreie seg om få sekunder.

Temperaturen må heller ikke være så høy at det inntreer skadelig kornvekst mellom formingstrinne.



Figur 8.15
Rekrystallisasjon under varmvalsing.