

## 5 DEFORMASJON AV METALLISKE MATERIALER

(Deformation of metals)

Vi må skille mellom elastisk og plastisk deformasjon av metaller og legeringer.

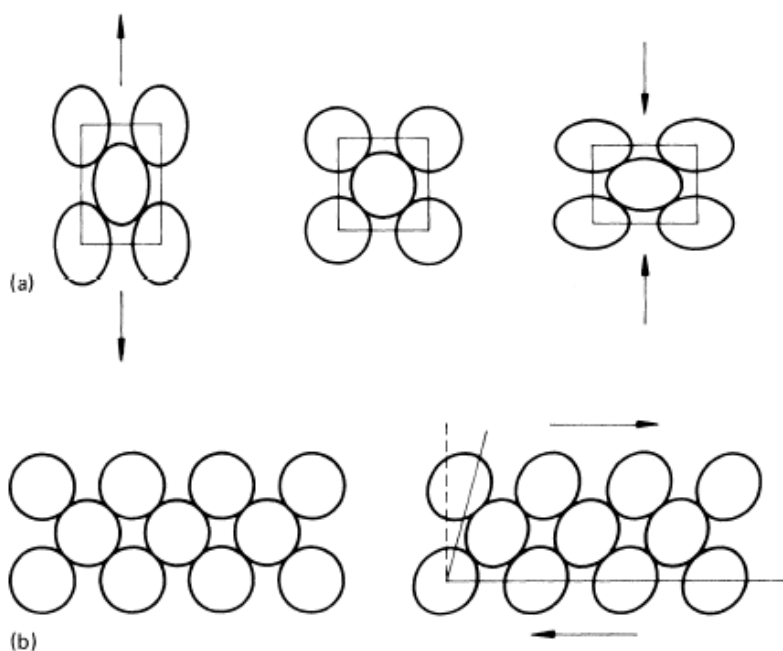
### 5.1 Elastisk deformasjon

En ytre mekanisk kraft som virker på et metall, vil i større eller mindre grad deformere atomgitteret.

Ved små spenning er beholder atomene sine naboer. Deformasjonen består av en liten endring i avstanden mellom atomene.

Elastisk deformasjon er karakterisert ved at:

- Formendringen er proporsjonal med kraften
- Tilstanden er reversibel. Når kraften opphører vil materialet gå tilbake til sin opprinnelige form.



Figur 5.1  
Elastisk deformasjon.  
a) Strekk og trykk b) Skjær

I det elastiske området gjelder:

For rent strekk:

$$\text{Strekkspenning } \underline{\sigma = E \cdot \varepsilon} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

hvor:  $E$  = Elastisitetsmodulen [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\varepsilon$  = Tøyning i strekk [mm/mm]

For rent skjær:

$$\text{Skjærspenning } \underline{\tau = G \cdot \gamma} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

hvor:  $G$  = Skjærmodulen [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\gamma$  = Tøyning i skjær [mm/mm]

$E$  og  $G$  er konstanter for vedkommende metall. De er knyttet til krefter og avstander i gitteret. For de fleste metaller og legeringer er  $E \approx 2,6G$ .

For legeringer som danner blandkrystaller, varierer E-modulen noenlunde lineært med sammensetningen. E-modulen ligger mellom komponentenes E-moduler.

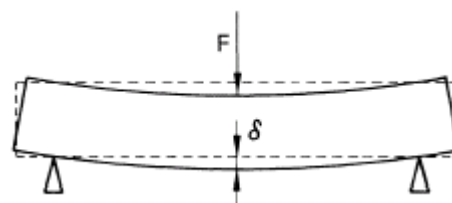
For legeringer som danner intermetalliske forbindelser, kjemiske forbindelser med et bestemt komponentforhold, er som oftest gitteret helt forskjellig fra komponentenes. Dette fører til en E-modul som er forskjellig.

E-modulen forandrer seg lite ved små variasjoner i sammensetningen av legeringen, ved kalddeformering og termisk behandling. Det motsatte er tilfelle med mekaniske egenskaper som hardhet, flytegrense, strekkfasthet m.fl.

Figuren under viser en bjelke av herdet stål som belastes med kraften F.

Sammenlignet med en bjelke i uherdet tilstand, vil bjelken av herdet stål kunne tåle en mye større kraft F, uten at bjelken lider en permanent deformasjon. Nedbøyningen  $\delta$ , som er proporsjonal med E-modulen og F, vil bli mye større.

Der hvor formforandringene er bestemmende for dimensjoneringen, har det ingen hensikt å herde materialet eller bruke kostbart leget stål med stor strekkfasthet i stedet for billig karbonstål.



Figur 5.2

Herdet stålbejelke belastet med kraften F vil få samme nedbøyning  $\delta$  som hvis ikke herdet. E-modulen er uforandret.

## 5.2 Plastisk deformasjon

### 5.2.1 Atomplanglidning

Plastisk deformasjon er karakterisert ved at deformasjonen ikke lenger er reversibel som ved elastisk deformasjon. Plastisk deformasjon oppstår ved større deformasjoner.

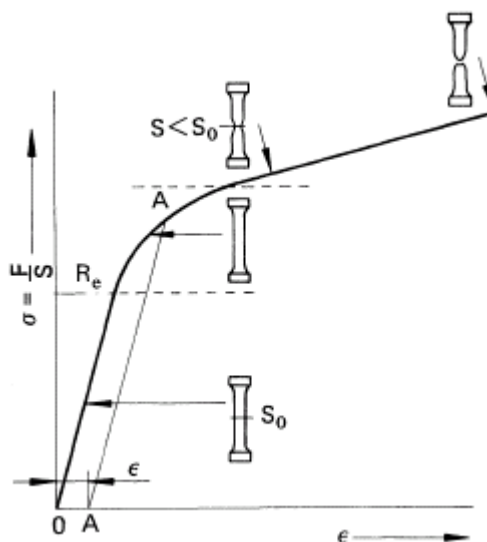
Figuren under viser hvordan tøyningen  $\epsilon$ , varierer med sann spenning  $\sigma$  i en strekkprøvestav.

$$\text{Sann spenning } \sigma = \frac{F}{S} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

hvor:  $F = \text{Strekkraft [N]}$   
 $S = \text{Stavens tverrsnittareal [mm}^2\text{]}$

I figuren er  $R_e$  = materialets flytegrense (også benevnt  $\sigma_F$ ). Ved spenninger lavere enn  $R_e$ , er tøyningen elastisk. Ved større spenninger beholdes den metalliske sammenheng i materialet, men tøyningen er nå plastisk. Avlastes for eksempel staven i punkt A, har det oppstått en endelig tøyning  $\epsilon = OA$  i staven.

Ved høyere spenninger konsentrerer deformasjonene seg hovedsakelig om et område av staven. Til slutt brytes den metalliske sammenheng med brudd som følge.

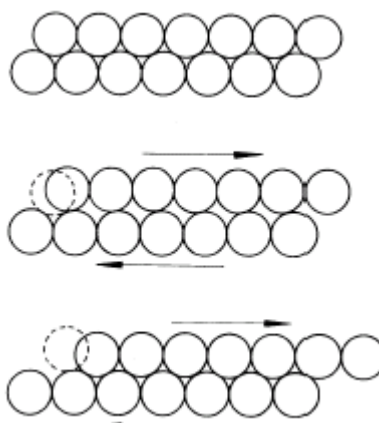


Figur 5.3

Elastisk og plastisk tøyning  $\epsilon$  som funksjon av sann spenning  $\sigma$ .

En konstruktør er først og fremst interessert i det elastiske området under flytegrensen,  $R_e$ . For formgivende prosesser som smiing, valsing, trekking, stansing m.fl., er forholdene under plastisk deformasjon helt avgjørende.

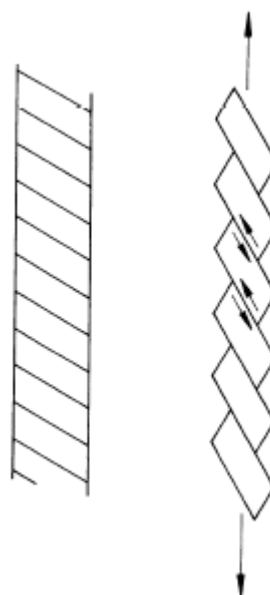
Plastisk deformasjon skjer som følge av at atomplan glir i forhold til hverandre under innvirkning av skjærspenninger  $\tau$ .



Figur 5.4

Plastisk deformasjon skyldes glidning mellom atomplan.

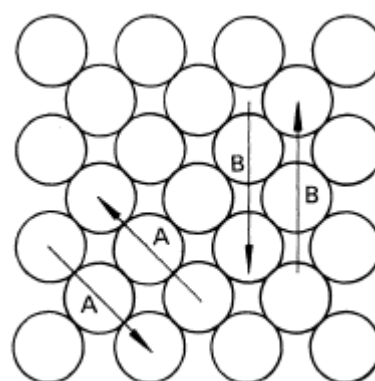
I en belastet strekkstav, oppstår skjærspenninger  $\tau$  i alle plan som danner en vinkel med stavaksen forskjellig fra  $90^\circ$ . Den plastiske tøyningen  $\epsilon$ , er virkningen av et stort antall slike glidninger.



Figur 5.5

Plastisk forlengelse i en strekkstav av et enkelt krystall er den integrerte virkning av mange glidninger.

Glidningen foregår lettest i slike plan der atomtettheten er størst, og i slike retninger der avstanden mellom atomene er minst.



Figur 5.6

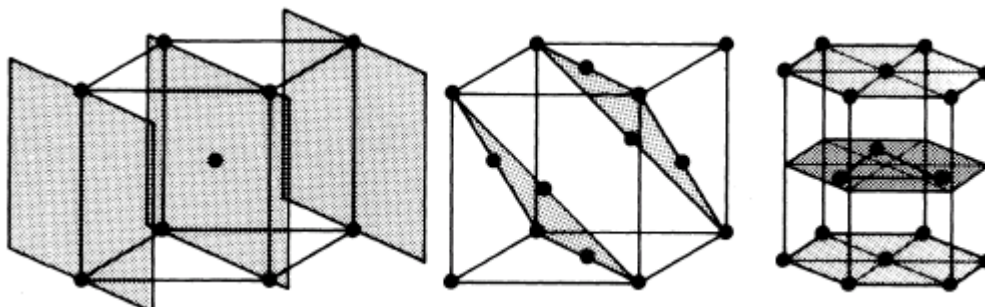
Glidning skjer lettere mellom tettpakkede plan A enn B.

I et stort antall metaller og legeringer er atomene ordnet i kubisk flatesentrert krystallstruktur. Denne struktur utmerker seg ved mange krystallplan med tettest mulig kulepakkning (atompakning). I praksis oppviser disse metallene høy duktilitet (seighet).

I kubisk romsentrert struktur finnes ingen plan med tettest mulig pakning, men mange plan med noe lavere tetthet.

Heksagonal struktur har bare ett plan med tettest mulig kulepakning der glidning kan foregå. Metaller med heksagonal struktur er derfor vanligvis sprø.

Figuren under viser eksempler på tettpakkede glideplan i de tre strukturene.

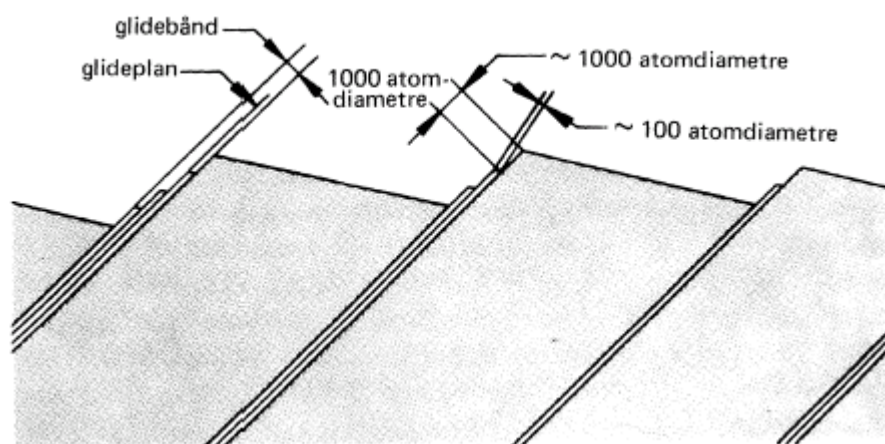


Figur 5.7

Noen tettpakkede plan i kubisk romsentrert, kubisk flatesentrert og tettpakket heksagonal struktur.

Evne til deformasjon ved atomplanglidning er en egenskap som er typisk for og stort sett begrenset til metallisk atombinding og krystallstruktur. Glidning kan foregå uten at den metalliske sammenheng brytes og uten at strukturen forandres, bortsett fra i planenes aller nærmeste omgivelser. Nærmere undersøkelser viser at når et plan har glidd, låses 100 - 200 plan omkring glideplanet fast, antagelig på grunn av at krystallstrukturen her er brakt i uorden. Utenfor denne fikserte sone kan så glidning på nye plan finne sted. Men glideplanene fordeler seg ikke jevnt i et deformert krystall, de konsentrerer seg i såkalte glidebånd.

I mikroskopet sees båndene som mer eller mindre skarpe linjer, men i virkeligheten består hvert bånd av atskillige plan. Avstanden mellom båndene kan være noen hundre ganger avstanden mellom glideplanene. Se de neste to figurene.



Figur 5.8

Når et krystall deformeres plastisk, konsentrerer glidningen seg i glidebånd. Innen hvert bånd kan det være omkring 10 aktive glideplan.



Figur 5.9

*Glidelinjer på overflaten av polykrystallinsk aluminium, forstørrelse 100x.*

De tekniske metaller er polykrystallinske. Korngransene som er uordnede områder, danner barrierer mot glidning. De enkelte korn har forskjellig orientering, slik at glidning på et plan og i en bestemt retning ikke uten videre kan fortsette i nabokornet. Deformasjonen i et korn må tilpasse seg deformasjonen i nabokornet, hvis ikke oppstår det sprekker mellom kornene. Jo flere glideplan og glidelinjer som er disponible, jo lettere foregår en slik tilpassning. Forutsetningen for glidning er at det er skjærspenninger til stede. I et polykrystallinsk materiale skjer glidningen på et stort antall plan dominert av plan med maksimal skjærspenning.

Glidebånd kan sees på med liten eller ingen forstørrelse på en polert overflate. Figuren over viser en strekkstav av aluminium.

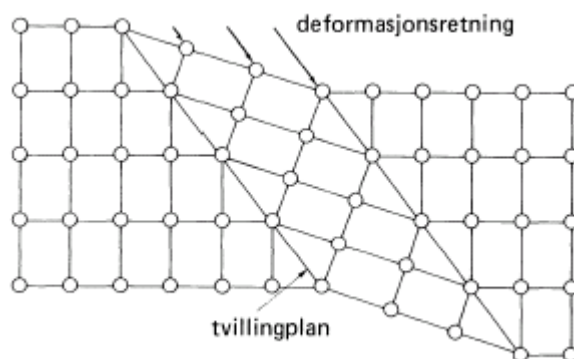
Ved skarpe tversnittsoverganger og/eller som følge av termiske spenninger forårsaket ved lokal oppvarming, oppstår en tre-akset belastningstilstand i materialet. Hovedspenningene er like store, og alle skjærspenninger er null. Materialet kan da ikke deformere seg plastisk, og det vil beholde sin form. Når normalspenningene blir tilstrekkelig høye (for eksempel 3 – 5 ganger flytegrensen), vil materialet lide et såkalt kløvningsbrudd. Dette er å oppfatte som en direkte separasjon av bestemte atomplan forskjellige fra glideplanene.

Tre-akset spenningstilstand er uønsket og fryktet. Materialet oppfører seg helelastisk, og lokale spenningspisser, som ellers utjevnes ved plastisk deformasjon (flytning), kan danne begynnende kløvningsbrudd.

### 5.2.2 Tvillingdannelse

Glidning mellom atomplan er den viktigste mekanisme ved plastisk formending. Under visse forhold kan det skje en formending ved tvillingdannelse.

Dette er en prosess der atomene flytter seg på en slik måte at gitteret i den deformerte del er et speilbilde av den ikke-deformerte del.



Figur 5.10

Plastisk deformasjon ved tvillingdannelse.

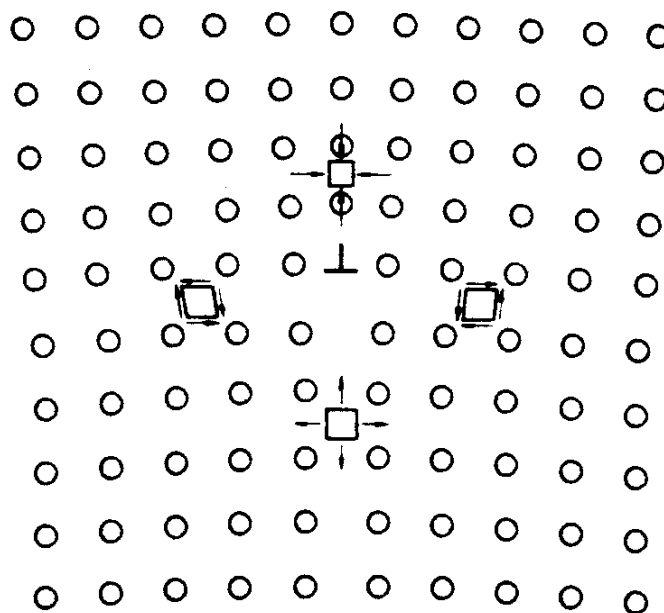
I de fleste materialer er den nødvendige skjærspenning for tvillingdannelse større enn den som kreves for glidning. Glidning blir derfor den foretrukne mekanisme.

Tvillingdannelse skjer i stål ved lav temperatur, og ellers i sink og magnesium ved alle temperaturer. De siste materialene har heksagonal gitterstruktur med bare ett glideplan.

### 5.2.3 Atomplanglidning under medvirkning av dislokasjoner

Linjefeil eller dislokasjoner er en feiltype av større betydning enn punktfeilene.

En kantdislokasjon oppstår når det skytes inn et ekstra atomplan, halvplan, i strukturen. I området omkring der halvplanet slutter, er atomavstandene forskjellige fra normalavstanden, og det oppstår en unormal spenningstilstand med trykk over planet og strekk under, se figuren under. I metaller strekker området seg atskillige atomavstander til alle sider fra den linje hvor halvplanet slutter.



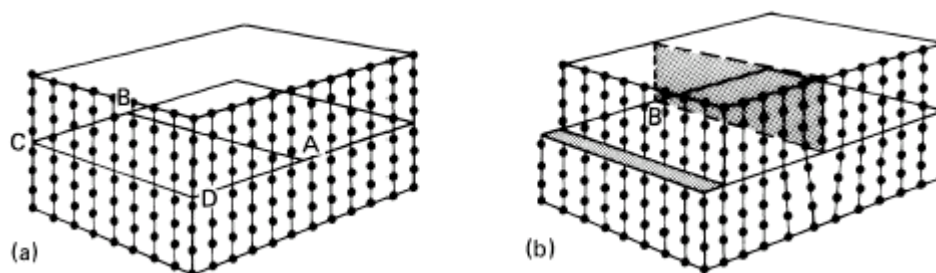
Figur 5.11

Spenninger rundt en kantdislokasjon. Trykk- over og strekkspenninger under.

Betegnelsen kantdislokasjon refererer seg egentlig til hele området med unormal atomavstand.

Vi kan lage en kantdislokasjon på følgende måte, se figuren under:

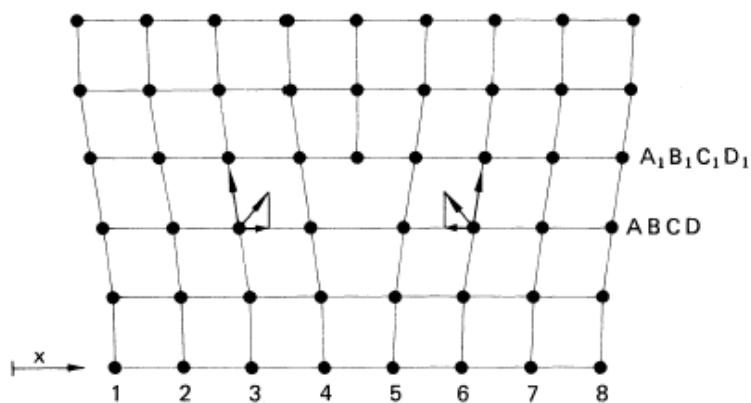
Anta først et krystall med et enkelt kubisk gitter som vist i figur (a). Krystallet snittes langs planet ABCD, og atomene i krystallet over snittflaten forskyves en atomavstand i forhold til atomene under snittflaten. Forskyvningen skal være parallell med snittflaten og med en kant i enhetscellen. I denne stilling bringes så atomene over og under snittflaten sammen igjen. Vi har nå fått et krystall som vist i figur (b) med en fortrukken struktur i et område med sentrum i dislokasjonslinjen A-B.



Figur 5.12  
Geometrien i en kantdislokasjon.

Anta videre at ABCD er et glideplan i atomgitteret, med glideretning  $x$  i figuren til høyre. Som en følge av dislokasjonen er det blitt kraftsymmetri i  $x$ -retningen omkring halvplanet. Derfor er for eksempel  $x$ -komponentene av krefter i rekke 3 i plan ABCD like store og motsatt rettet komponentene i rekke 6.

Plan ABCD kan følgelig gli på plan  $A_1B_1C_1D_1$  under virkningen av en veldig lav skjærspenning.



Figur 5.13  
Det er kraftsymmetri i  $x$ -retningen mellom tilsvarende atompar på begge sider av halvplanet. Derfor kan plan ABCD gli på plan  $A_1B_1C_1D_1$  med meget lav skjærspenning.

Under glidningen forskyver dislokasjon seg i gitteret som vist i figuren til høyre.

Symmetrien i kraftbildet forrykkes noe når halvplanet skifter plass.

Vi kan oppfatte dislokasjonslinjen som en grense i glideplanet mellom glidd og ikke-glidd område, figur (b).

Når linjen har passert gjennom krystallet, er dislokasjonslinjen ”brukt opp”.

Den resulterende enhetsforskyvning kalles Burgers vektor, og i et enkelt kubisk gitter er den lik atomavstanden.

Det essensielle i at atomplan-glidning under medvirkning av dislokasjoner er at atomene i glideplanet beveger seg forbi hverandre etter tur. (I et perfekt gitter forutsettes det at alle atomene beveger seg under ett.)

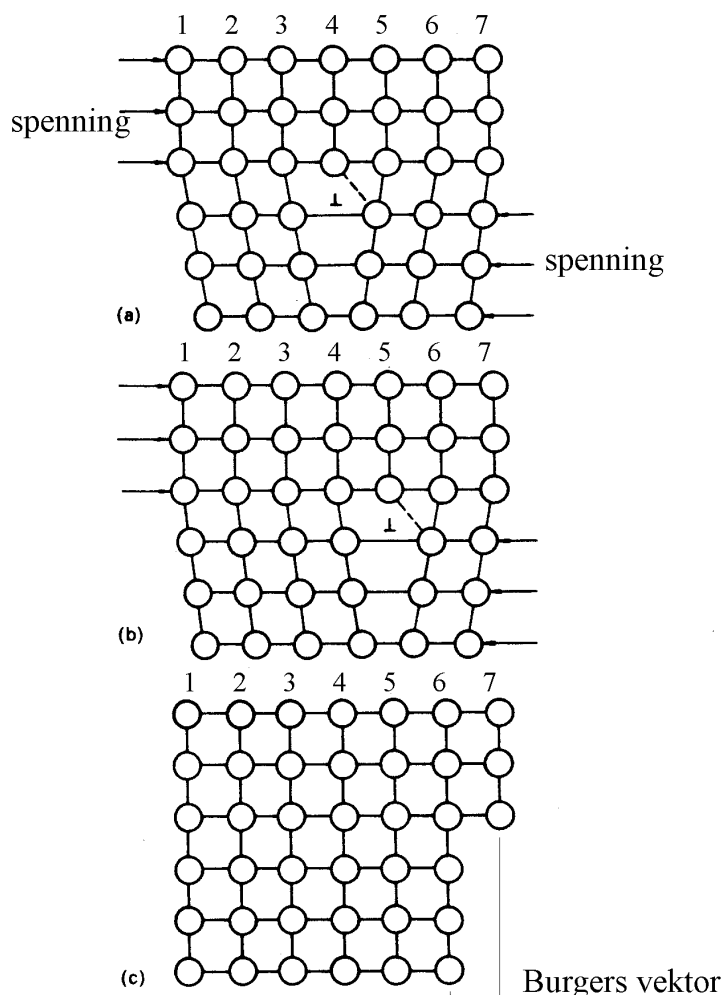
Den midlere skjærspenning i glideplanet blir liten fordi bare få atombindinger brytes samtidig.

En analogi til bevegelse ved hjelp av dislokasjoner er en larves bevegelse. Se figuren til høyre.

Larven kryper ikke ved å trekke frem hele kroppen, fordi dette gir en stor friksjonskraft mot underlaget. Den trekker seg sammen og lager en hump på halen, og humpen passerer så langs kroppen. For hver passering fra hale til hode flytter larven seg et lite stykke frem.

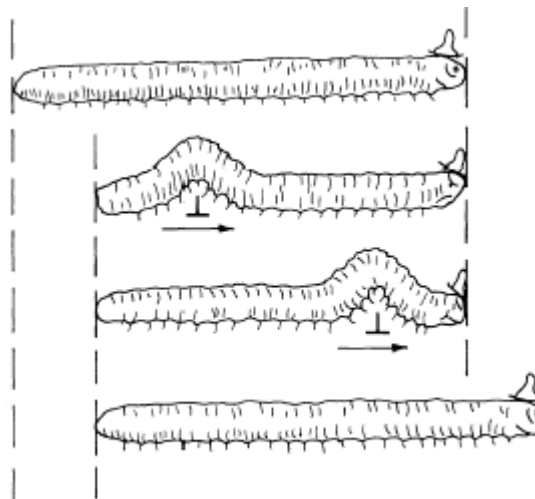
Figur 5.15

En larve beveger seg etter samme mønster som atomplan glir på hverandre under medvirkning av dislokasjoner.



Figur 5.14

En dislokasjon som er riktig plassert i forhold til et glideplan, kan bevege seg i gitteret slik at det endelige resultat blir en glideavstand lik Burgers vektor. I et enkelt kubisk gitter er Burgers vektor lik atomavstanden.



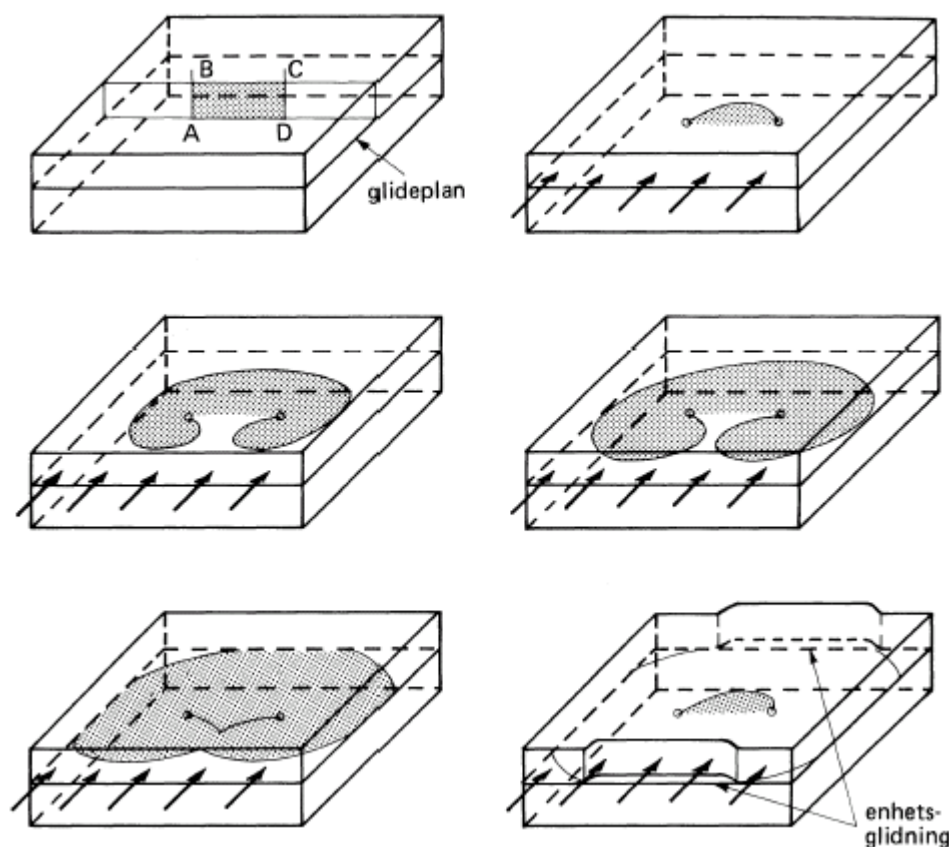


### 5.2.4 Dislokasjonsforming

Vi antar at dislokasjoner kan oppstå under nedkjøling av et materiale fra støpetemperatur, ved at overskuddsvakanser diffunderer og danner vakansplan. Et vakansplan er det samme som et manglende atomplan og danner to dislokasjoner.

De fleste materialer lar seg deformere 50 – 100 %. De ”inngrodde” dislokasjoner som dannes under nedkjøling etter støping eller gløding, er ikke mange nok til å forklare metallenes duktilitet (seighet).

Vi antar at nye dislokasjoner frembringes ved plastisk deformasjon. En slik mulig mekanisme er foreslått av Frank – Read, se figuren under.



Figur 5.16

Frank – Read mekanisme for å frembringe dislokasjoner.

Fra figuren, a) øverst venstre til f) nederst høyre:

- ABCD er et ekstra atomplan i krystallet. BADC er en dislokasjonslinje. AD ligger i glideplanet.
- Vi belaster krystallet med ytre krefter slik at det opptrer skjærspenning i glideplanet.
- AD tvinges ut i en bue. Endepunktene A og D står fast siden de er en del av dislokasjonene AB og DC som ikke er påvirket av noen skjærspenning.
- Ved økende spenning i glideplanet ekspanderer dislokasjonsbuen. Den dreier seg spiralformet omkring A og D.
- Spiralene er motsatte dislokasjoner og tilintetgjør hverandre når de faller sammen.
- Vi ender opp med en lukket dislokasjonslinje innenfor hvilken en enhetsglidning har funnet sted.  
Den opprinnelige dislokasjonslinje AD er klar til ny ekspansjon.