

DANSK METALLURGISK SELSKABS VINTERMØDE DEN 13.-14.JANUAR 1969

Foredrag nr. 7

PROCESPARAMETRENS INDFLYDELSE PÅ MATERIALEVALG  
VED DEFORMATIONSFORMGIVNING (II)

Civilingeniør Leo Alting  
Afdelingen for Mekanisk Teknologi  
Danmarks tekniske Højskole

PROCESPARAMETRENE'S INDFLYDELSE PÅ MATERIALEVALG  
VED DEFORMATIONSFORMGIVNING (II)

Hastigheden som procesparameter er især forbundet med høj-effektformgivningsprocesserne, der har tiltrukket sig en stadig stigende opmærksomhed de senere år. Begrebet høj-effektformgivning omfatter de processer, hvor den nødvendige deformationsenergi overføres inden for meget korte tidsrum, således at der bliver tale om store effekter. En række forskellige energityper anvendes, og fig. 1 viser efter Alting [1] højeffektformgivningsprocesserne klassificeret efter energitype. Der er yderligere anført overføringsmedium og vist proceseksempler inden for hver energitype. De processer, der er indeholdt i klassifikations-skemaet benævnes: 1) Eksplosionsformgivning (A1), 2) Formgivning med laveksplivstoffer (A2), 3) Formgivning med eksplosive blandinger af luftarter (A3), 4) Elektrohydraulisk formgivning (B1), 5) Elektromagnetisk formgivning (B2), 6) Formgivning med komprimerede luftarter (C1) og 7) Formgivning med flydende luftarter (C2). Yderligere omtale vil ikke blive givet her, men der kan henvises til [1], hvis man ønsker en gennemgang af de enkelte processers teknologi og anvendelsesområder.

Den vel nok vigtigste forskel mellem de konventionelle processer og højeffektformgivningsprocesserne er den hastighed (tøjningshastighed  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} = \frac{1}{l} V$ , hvor  $V$  er værk-tøjs- eller emnehastigheden og  $l$  den øjeblikkelige emnelængde), hvormed materialerne formgives. F.eks. kan nævnes, at ved eksplosionskontaktoperationer ligger tøjningshastigheden  $\dot{\epsilon}$  i området  $10^5 - 10^6 \text{ sek}^{-1}$  og ved eksplosionsformgivning samt elektrohydraulisk og elektromagnetisk formgivning i området  $10^2 - 10^4 \text{ sek}^{-1}$ . De materialer, der kan formgives ved hjælp af højeffektformgivningsprocesserne,

### Klassifikation af højeffektformgivningsprocesser

Energiform	Overføringsmedium	Eksempler på typiske processer
<b>A. Kemisk energi</b>		
1. Højeffektstoffer (f.eks. TNT, PETN)	1. Direkte 2. Luft 3. Væske (vand) 4. Faste (kornede)	
2. Laveffektstoffer (f.eks. krudt)	1. Direkte 2. Væske 3. Værktøj (stempel)	
3. Eksplosive bl. af luftarter (f.eks. ilt + acetylen)	1. Direkte 2. Væske 3. Værktøj (stempel)	
<b>B. Elektrisk energi</b>		
1. Elektrisk gnistudladning	1. Væske (vand)	
2. Magnetfelter	1. Emnet	
<b>C. Mekanisk energi</b>		
1. Komprimerede luftarter	1. Værktøj (stempel)	
2. Flydende luftarter (kvælstof)	1. Direkte 2. Væske (3. Værktøj)	

varierer fra blødt stål og aluminium til de nye superlegeringer. Elektromagnetisk formgivning er den eneste proces, der i sig selv sætter en vis grænse for, hvilke materialer der kan formgives på denne måde, idet der kræves, at materialet (eller evt. blot en belægning på det) skal være elektrisk ledende. I almindelighed kan et hvilket som helst materiale, der lader sig formgive ved hjælp af de konventionelle metoder, også formgives ved hjælp af højeffektformgivningsprocesserne. Nogle materialer, der ikke eller kun vanskeligt lader sig formgive ved lave deformationshastigheder, viser sig endog at have bedre formbarhed ved store hastigheder.

Problemet vedrørende karakteriseringen af materialernes opførsel ved de store deformationshastigheder (tøjningshastigheder) er grundlæggende for en kvantitativ analyse af højeffektformgivningsprocesserne og for valg af materialer til formgivning under disse betingelser.

Det er nødvendigt - for at undgå fejlforsøg - at kunne vurdere, om et givet materiales sejhed (formbarhed) er tilstrækkelig til, at den ønskede facon kan opnås, uden der sker brud i emnet. For at kunne foretage en sådan vurdering må man have kendskab til de optrædende spændings- eller deformations-tilstande, deformationshastigheden og dennes indvirkning på materialets flyde- og brudgrænse. Det viser sig her ved en nærmere undersøgelse, at et givet materiales styrke og formbarhed (f.eks. karakteriseret ved den jævnt fordelte tøjning inden indsnøring og brud, kaldet instabilitetstøjningen) er betinget af:

1. Emnets geometri
2. Deformationshastigheden
3. Belastningstypen (formgivningsmetode)

Hvad angår belastningstypen, bestemmer den sammen med emnets geometri de spændingstilstande, hvorunder emnet formgives, d.v.s. om den hydrostatiske spændingskomponent er træk eller tryk. Endvidere påvirker deformationshastigheden ved en given geometri og belastningstype materialets styrke og formbarhed. I det følgende skal kun pladeformgivningsprocesserne betragtes. For disse gælder, at den hydrostatiske spændingskomponent oftest er træk.

Formgivningstemperaturen er som omtalt af T. Wanheim under 6 af stor betydning for både styrke og sejhed, men virkningen afhænger af både materiale, deformationshastighed og geometri. Her vil hovedvægten blive lagt på formgivning ved stuetemperatur, da højeffektformgivningsprocesserne sjældent udføres som varmformgivning. Ikke alene materialets formbarhed påvirkes af deformationshastigheden, men også det færdige produkts egenskaber både mekaniske og metallurgiske.

I det følgende skal tøjningshastighedens indvirkning på materialernes styrke og formbarhed og produktets egenskaber som følge af formgivningen behandles kort.

#### 1. Tøjningshastighedens indvirkning på materialets arbejdslinie

For de fleste materialer gælder, at en voksende tøjningshastighed medfører, at både flyde- og brudgrænse øges mere eller mindre.

Fig. 2 viser principielt, hvorledes tøjningshastigheden indvirker på flydekurven. Betydningen af den viste kritiske tøjningshastighed vil fremgå af det følgende. Som det fremgår af fig. 2, vokser det nødvendige deformationsarbejde med tøjningshastigheden, idet dette, pr. volumenenhed af

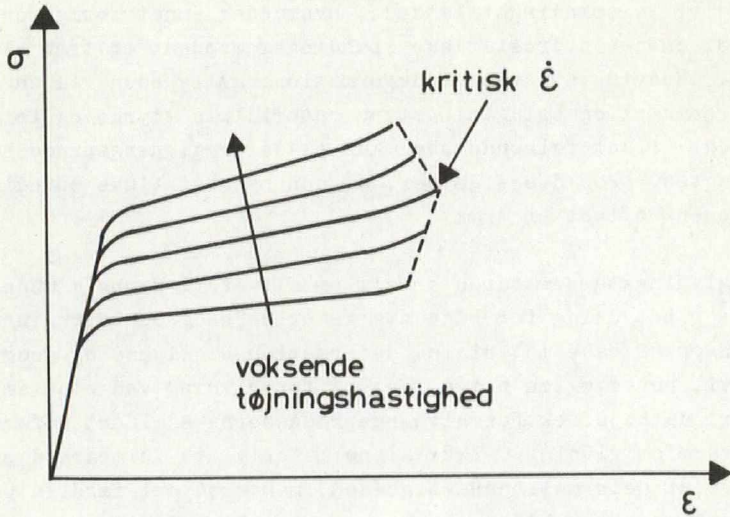


Fig. 2. Tøjningshastighedens indflydelse på materialets arbejdslinie.

materialet, er lig med arealet under spændings-tøjningskurven. Arbejdsbehovet kan blive op til tre gange større ved store tøjningshastigheder end ved små afhængig af materiale og temperatur. Normalt må man vente, at deformationshastighedens indvirkning er større ved høje temperaturer.

Da højeffektformgivningsprocesserne (i kraft af de store deformationshastigheder) er i stand til at tilføre de krævede energimængder, er disse forhold ikke af så stor betydning, som man kunne vente. Hovedspørgsmålet er formbarhed og ikke energi.

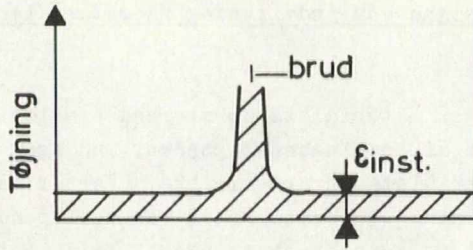
## 2. Tøjningshastighedens indvirkning på materialernes formbarhed

Som nævnt afhænger materialets formbarhed (instabilitetstøjning) ikke alene af tøjningshastigheden, men også af emnets geometri og materialets karakteristika. For at belyse geometriens indvirkning på formbarheden ved varierende tøjningshastigheder skal følgende geometriske tilfælde betragtes:

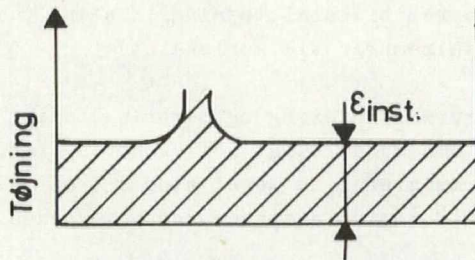
- 2.1 Enakset træk (trækprøvning)
- 2.2 Plan tøjningstilstand (rørekspandering)
- 2.3 Balanceret biaksial tøjningstilstand (udbulning af metalmembran til kuglekalot)

Grunden til, at rørekspandering og membranudbulning (endebunde og bagerformede emner) er valgt som eksempler, er, at disse to tilfælde repræsenterer en meget stor del af de emneformer, hvortil højeffektformgivningsprocesserne anvendes.

2.1 Enakset træk. Det viser sig her, at en forøgelse af tøjningshastigheden medfører en øget stabilitet i prøvelegemet, hvilket giver sig udslag i en voksende instabilitetstøjning. Fig. 3 viser et typisk billede for et materiale undersøgt ved lave og høje tøjningshastigheder. Dette er ensbetydende med, at nogle materialer kan undergå større plastiske deformationer ved store deformationshastigheder end ved små.



a) Lille tøjningshastighed (statisk)



b) Stor tøjningshastighed

Fig. 3. Tøjningshastighedens principielle indvirkning på tøjningsfordelingen i et trækprøvelegeme.

Når man øger hastigheden endnu mere, viser der sig en kritisk hastighed, hvorover formbarheden falder stærkt. Denne kritiske hastighed (eller hastighedsområde) nås, når deformationshastigheden overskrider deformationens forplantningshastighed i materialet. Fig. 4 viser den kvalitative virkning af en voksende deformationshastighed på trækprøvens forlængelse.



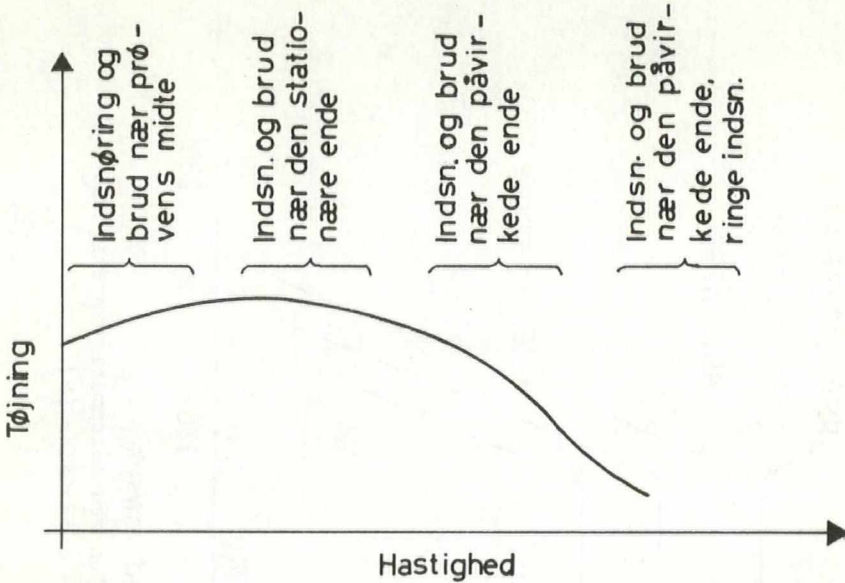


Fig. 4. Den kvalitative virkning af deformationshastigheden på et trækprøvelegemes forlængelse.

Wood [2] har undersøgt en del forskellige materialer, og fig. 5 gengiver nogle af hans resultater. Af figuren fremgår det, at man kan klassificere de undersøgte materialer i tre grupper, se tabel 1. Denne tabel viser, at forlængelsen afhænger af den kritiske hastighed, idet materialer med stor kritisk hastighed udviser en stor instabilitets-tøjning, og omvendt lav kritisk hastighed medfører lav instabilitetstøjning.

Allerede heri har man en del af svaret på, hvorfor man hævder, at mange materialer ved højeffektformgivning kan deformeres plastisk til større deformationer end ved konventionel formgivning.

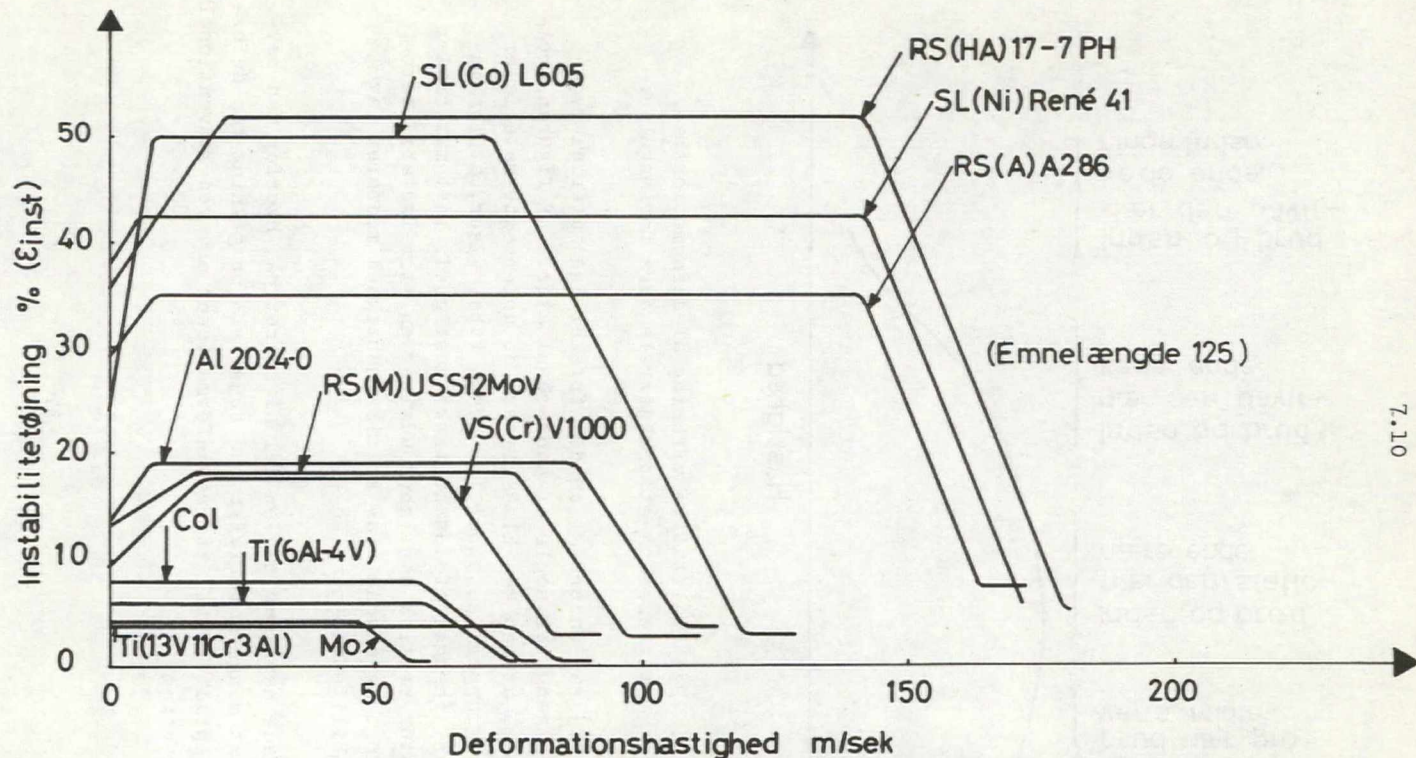


Fig. 5. Instabilitetstøjningens variation med deformationshastigheden ved trækprøvning af forskellige materialer [2] .

Gruppe	Materiale	Maksimal instabilitets-tøjning %	Den øvre kritiske hastighed m/sek
1	Halvaustenitisk rustfrit stål (17-7 PH): n = 0,320	52 (36)	142
	Austenitisk rustfrit stål (A286): n=0,386	35 (29)	141
	Superlegering på nickelbasis (Rene 41): n = 0,386	42 (38)	146
	Superlegering på coboltbasis (Haynes 25): n = 0,443	50 (22)	72
2	Værktøjsstål (martensitisk chromstål)(Vascojet 1000): n=0,150	18 (10)	63
	Martensitisk rustfrit stål (USS 12 MoV): n = 0,222	18 (13)	76
	Ren aluminium (2024-0): n = 0,25	19 (13)	87
3	Titanium: n = 0,08	6 (6)	61
	Betatitanium: n = 0,05	4 (4)	76
	Molybdæn:	4 (4)	46
	Columbium: n = 0,100	8 (8)	49

Tabel 1. Øvre kritisk hastighed for forskellige materialer og den tilsvarende instabilitetstøjning. Yderligere er de statiske instabilitetstøjninger angivet (i parentes), og materialets deformationshærdningsekspONENT er anført efter materialebetegnelsen [2].

2.2 Plan tøjningstilstand (rørekspandering). Rørekspanderingsforsøg viste, at mange materialer også her fik øget formbarhed (instabilitetstøjning) ved voksende hastighed, men uanset hvor stor man gjorde tøjningshastigheden, fandt man ingen kritisk hastighed i modsætning til trækprøvningen. Dette skyldes geometrien, idet man ikke får deformationsbølger, der skal forplante sig for at udbrede deformationen. Fig. 6 viser nogle af Woods resultater, hvoraf det fremgår, at de austenitiske stål (A286) og titanium har en formbarhed, der helt er uafhængig af hastigheden, medens de øvrige får en forbedret formbarhed indtil en vis hastighed, hvorefter den er konstant.

2.3 Balanceret biaksial tøjningstilstand (membranudbulning (eng.: bulging)). Ved denne situation viser det sig, at man også får en øget formbarhed for mange materialer med voksende hastighed. Fig. 7 viser nogle af Woods resultater. Heraf fremgår det, at de fleste materialer kun udviser en forøget formbarhed indenfor visse hastighedsgrænser. Et hastighedsområde på 30 - 45 m/sek efter formbarhedsstigningen er normalt. Som det fremgår, ligger formbarhedsforøgelsen for superlegeringerne og de rustfrie stål ved hastigheder mellem 150 og 250 m/sek, hvilket ligger indenfor det hastighedsområde, der kan dækkes af eksplosionsformgivning, elektrohydraulisk og elektromagnetisk formgivning.

De tre materialer A286, Rene 41 og Vascojet 1000 udviser et bemærkelsesværdigt kurveforløb, idet der sker et formbarhedsfald med voksende hastighed 0 - 20 m/sek. Men dette fald opvejes rigeligt af den voksende formbarhed ved højere hastigheder.

De her omtalte eksperimentelle resultater kan approksimativt bindes sammen med spændings-tøjningskurven for de respektive materialer.

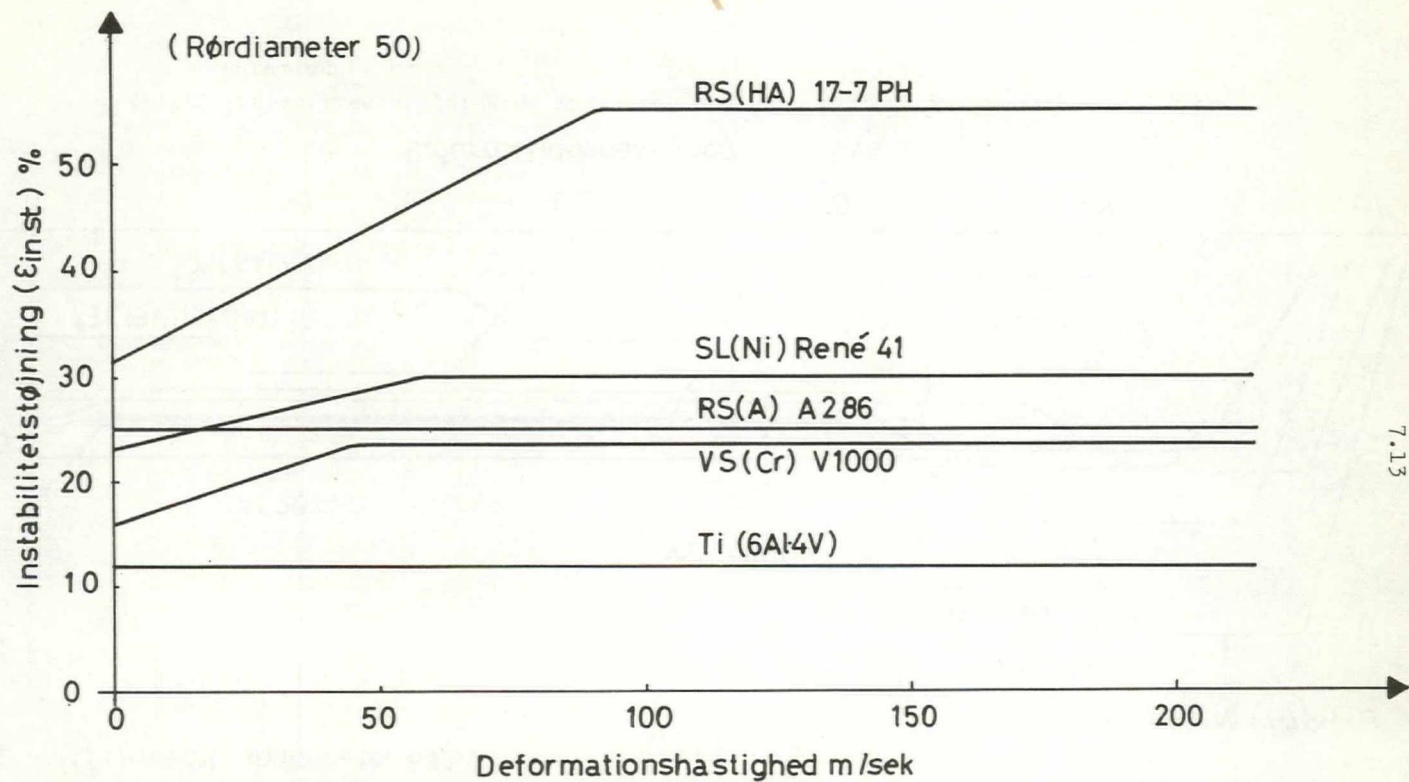


Fig. 6. Instabilitetstøjningens variation med deformationshastigheden ved rørekspandering [2].

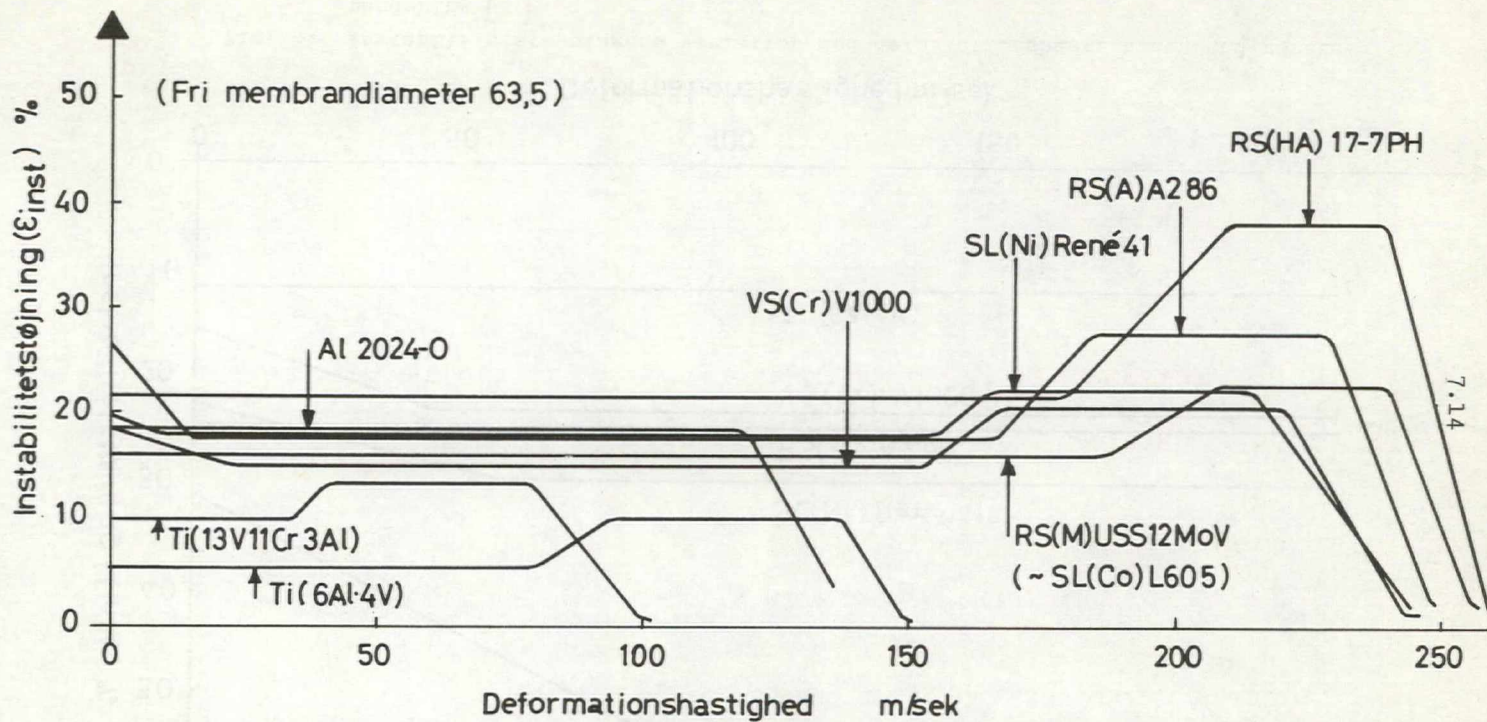


Fig. 7. Instabilitetstøjningens variation med deformationshastigheden ved membran-  
udbulning [ 2 ] .

I det plastiske område kan spændings-tøjningskurven udtrykkes ved  $\sigma = B \epsilon^n$ , hvor  $\sigma$  er den sande spænding, B en konstant og  $\epsilon$  den logaritmiske tøjning og n deformationshærdningsekspONENTEN. Det viser sig her, at for  $n \leq 0,25$  er instabilitetstøjningen ved trækprøvning mindre end, hvad der opnås ved rørekspandering og membranudbulning. For  $n > 0,32$  er instabilitetstøjningen ved trækprøvning større end, hvad der kan opnås ved rørekspandering og membranudbulning. Således vil materialer, der udviser ringe deformationshærdning, kunne forventes at få forøget formbarhed ved komplekse tilstande, medens stærkt deformationshærdende materialer får mindre formbarhed. Dette indebærer, at man ud fra materialets deformationshærdningsekspONENT får mulighed for at vurdere dets formgivningsmuligheder. Undersøgelser af den omtalte type kan anvendes til at opstille kurver og tabeller over forskellige materials formbarhedsgrænser ved forskellige geometriske udformninger.

### 3. Tøjningshastighedens indflydelse på det færdige produkts egenskaber

Ikke alene ændres materialernes formbarhed ved store deformationshastigheder, men det færdige produkts egenskaber er også mere eller mindre ændret.

3.1 Deformationshærdning og styrke. Det viser sig i almindelighed, at styrkeforøgelsen ved højeffektformgivning svarer nogenlunde til, hvad man opnår ved konventionel formgivning til samme deformation. Der findes dog undtagelser, hvor man opnår en usædvanlig stor styrke ved højeffektformgivning (rustfrit stål AM350).

3.2 Mikrostrukturen. Indvirkningen på mikrostrukturen er i nogen grad afhængig af operationsbetingelserne, idet f.eks. de tryk, der udøves på materialeoverfladen, er meget større ved kontaktoperationer end ved afstandoperationer. Wood mener, at de kritiske spændinger, der initierer slip, mekaniske tvilling-dannelser og skørt brud, er en funktion af deformationshastigheden og temperaturen. Den kritiske spænding for slip vokser med voksende hastighed, medens tvillingdannelsesspændingen er mindre afhængig af denne faktor. Således vil der blive en voksende tendens til, at materialerne deformerer ved tvillingdannelse ved store deformationshastigheder.

Endvidere kan der især ved kontaktoperationer blive tale om trykinducerede fasetransformationer. F.eks. sker der i jern en fasetransformation ved et tryk på 131 kbar, og strukturen ligner en kulstoffri martensit.

Disse mikrostrukturelle ændringer kan påvirke produktets brugsegenskaber, og det må erindres, at virkningen ikke nødvendigvis er fordelagtig.

3.3 Spændingskorrosion. En af de vigtigste egenskaber ved rustfrit stål er dets korrosionsmodstand. Verbraak [3] fandt, at eksplosionsformgivet stål viste meget ringe korrosionsmodstand. Det kan blive nødvendigt med en afspændingsglødning eller endog fuld udglødning, hvis spænding-korrosionsproblemet helt skal undgås. Men forsøgsmaterialet er endnu for sparsomt til, at dette forhold skal betragtes som endeligt fastslået.

For andre materialer foreligger der intet herom, men man må være opmærksom på, at det kan optræde.



3.4 Udmattelsesstyrke. Her er de fremkomne forsøgsresultater noget modstridende, men i almindelighed kan man regne med, at materialer deformeret ved store hastigheder får en udmattelsesstyrke, der svarer til, hvad der opnås ved konventionel formgivning.

Foruden at skulle tage hensyn til de nævnte forhold ved formgivning ved store hastigheder må man naturligvis også opfylde de krav, den specifikke proces stiller bl.a. med hensyn til facon og værktøj.

#### Litteraturliste

1. Alting, L.: "Højeffektformgivning af metaller".  
Forskning nr. 11 og 12, 1967.
2. Wood, W.: "Final Report on Sheet Metal Forming  
Technology".  
Vol.I & II, Chance Vought Corp.  
AD 416412.
3. Verbraak, C. A.: "How Can High Rate Forming Be Applied  
Without Deteriorating Metal Properties".  
CIRP Annalen XI, 3, 1962.

