

RISØ

AFDELINGEN FOR MATERIALEFORSKNING

**EKSPERIMENTEL BESTEMMELSE
AF
VÆRKTØJSMATERIALERS CYKLISKE PLASTICITET**

POVL BRØNDSTED

✉: Postboks 49, 4000 Roskilde, ☎: 4677 5704, ✉: povl.brondsted@risoe.dk

Abstract.

Mechanical testing methods for determining the necessary material parameters for modelling the cyclic plasticity of high strength materials are described. The differences in stress controlled, strain controlled and plastic strain controlled tests are shown by examples, where cyclic hardening and hysteresis loop from tests on a conventional tool steel are determined. The paper illustrates the complexity in measuring the necessary input data for a complex material model based on continuum damage mechanisms.

Indledning.

Ved design af værktøjer til tryk og formgivningsprocesser bevæger man sig ofte på kanten af materialernes holdbarhed og styrkegrænser. Der stilles således meget store krav til et så nøjagtigt kendskab til deres egenskaber og styrkedata som muligt.

Som præsenteret i artikler i denne bog [1], [2] og i projektrapporter [3], [4] og publikationer [5], [6] er det muligt at opstille modeller, der beskriver værktøjernes belastninger og således sætter kravene til værktøjsmaterialerne. Det er derfor af største betydning for modellernes følsomhed at kunne definere og måle de materialeparametre, der er bestemmende for styrken så nøjagtigt, at det rette materialevalg kan foretages ud fra modellernes forudsigelser. Således bliver det ofte materialernes begrænsninger, der bliver styrende for værktøjsdesignet, og materialet begrænser anvendelsen. Det er det tætte samspil mellem designønsker og muligt opnåelige materialeegenskaber, der er kernen i optimeringsprocessen.

Materialerne er under anvendelsen udsat for både store statiske elastiske belastninger og for lokale cykliske belastninger i det plastiske område. Det er de lokale cykliske belastninger, der er mest skadedannende og hermed begrænser værktøjets levetid. Under anvendelse opstår skaderne globalt i materialet, dvs. jævnt fordelt afhængig af det generelle belastningsfelt. Når disse skader lokaliseres er det primært på grund af forskelle i belastningssituationen bestemt af bl.a. friktionsforhold, lokale korrosive angreb, forskelle i emnematerialer, dimensionsvariationer i disse, temperaturgradienter mm.

I de her betragtede belastningssituationer er det de lokale cyklisk plastiske deformationer, der fokuseres på som de dominerende i skadesforløbet. Disse forhold har vi gennem en lang årrække studeret i forskningsprojekter (MUP, IVC) som et samarbejde mellem STRECON[®] Danfoss, Afdelingen for Materialeforskning, Risø, Institut for Produktion, DTU, Institut for Faststofmekanik, DTU ved projekter i form af afgangprojekter, ph.d. projekter og egenforskningsprojekter. Status for arbejdet er, at vi i dag har en avanceret model til beskrivelse af den cykliske plasticitet i højstyrkematerialerne, en implementering af modellen i FEM modeller og metoder til bestemmelse af de materialeegenskaber, der anvendes som input til materialemodellen. Arbejdet fortsætter i disse år med et nærmere studium af mikrostrukturernes indflydelse på egenskaberne og med en endnu mere uddybende materialemodellering og følsomhedsanalyser af materialemodellen. Dette vil foregå indenfor rammerne af et ph.d. studium under Det Ingeniørvidenskabelige Center på Risø i samarbejde med Institut for Pro-

duktion, DTU samt i et BRITE projekt under den 5^{te} Europæiske rammeprogram. Der foreligger et stort arbejde i at få bestemt de nødvendige parametre for kandidat materialer til anvendelser i højt belastede værktøjer. I dette indlæg vil jeg præsentere nogle af de nødvendige metoder til måling af de egenskaber, der skal bestemmes for at kunne modellere materialernes respons på statiske og udmattelsesmæssige belastninger.

Egenskaber og materialekarakterisering.

En avanceret materialemodel, der kan anvendes til beskrivelse af materialers cykliske plasticitet er som nævnt beskrevet i denne bog [1]. Omkring 20 materialeparametre er nødvendige for en fuldstændig modellering af materialets respons på cyklisk belastning. Disse parametre udledes fra eksperimentelle mekaniske målinger af materialernes statiske og udmattelses egenskaber. I denne gennemgang af nogle af testmetoderne er resultater eksemplificere ved resultater fra værktøjsmaterialet CALMAX.

Materiale.

CALMAX er et krom-molybdæn-vanadium legeret konventionelt værktøjsstål fra UDDEHOLM. Standardsammensætningen er givet i Tabel 1.

Tabel 1. Typisk sammensætning af CALMAX

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
%	0.6	0.35	0.8	4.5	0.5	0.2

Det afprøvede materiale er hærdet til HRC 55

CALMAX finder typiske anvendelse i klippe- og koldformgivningsværktøjer.

Mekanisk prøvning.

Den mekaniske prøvning kan opdeles i tre grupper af prøvning

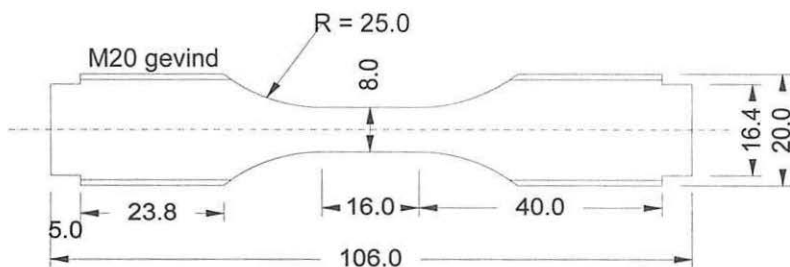
- Statisk
- Dynamisk (Udmattelse)
- Brudmekanisk

Den sidste gruppe vil ikke blive behandlet her, men er af lige stor betydning for den endelige modellering af værktøjernes totale levetid.

Statisk prøvning er til bestemmelse af materialets elastiske egenskaber (E-modul, G-modul, Poissons forhold) og til bestemmelse af flydespændinger, trækstyrker, deformationshærdningsforløb, duktilitet m.m.

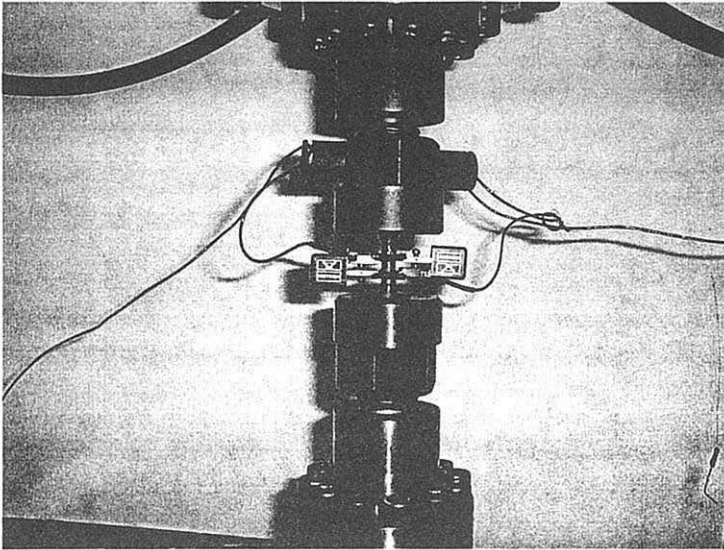
Dynamisk prøvning eller udmattelsesprøvning kan udføres under kontrollerede belastninger eller deformationer ved konstante eller varierende (stokastiske) sekvenser. Til de her beskrevne bestemmelser indgår sekvenser ved konstante amplituder og ved forskellige midelværdier (varierende R-forhold, hvor $R = \text{minimum belastning}/\text{maksimum belastning}$). Der er gennemført målinger ved konstant spændingsamplituder, konstant tøjningsamplitude og under konstant plastisk tøjningsamplitude. De første er foretaget ved forskellige R-forhold. Den sidste vil altid foregå ved $R = -1$. I det følgende er givet eksempler på disse tests. Der er ikke gennemgået en fuldstændig parameterbestemmelse, da dette er et meget omfattende studium og ikke på nuværende tidspunkt fuldstændiggjort.

I et tidligere projekt [3] blev en universal emnegeometri til de mekaniske prøvninger designet. Geometrien er ikke optimal for de enkelte tests, men er valgt på grund af anvendelighed i alle prøvningstyper. Geometrien er vist i Figur 1.



Figur 1. Prøveemne geometri.

Den kombinerede træk-tryk prøvning kræver søjlestabilitet af emnet så ustabil udbøjning (bukling) undgås under trykbelastningen. Dette kræver udover en forholdsvis kort målelængde en særdeles stiv opspænding af prøveemnet. Dette har vist sig at være muligt i en servohydraulisk træk/tryk/torsion prøvemaskine, idet den hydrauliske cylinder i denne type maskine er ekstra lejret pga. torsionsmulighederne. Herved undgås af fremstille et specielt opspændingsværktøj med ekstra vertikal styring. Den anvendte opspænding er vist i Figur 2.



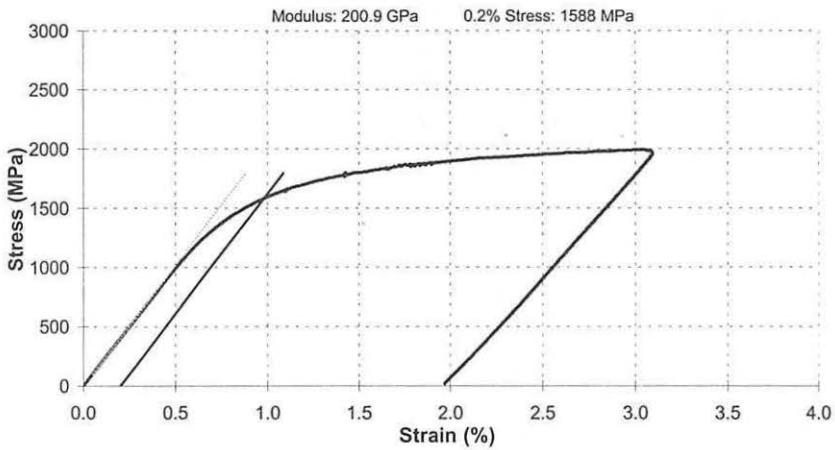
Figur 2. Opstilling til træk-tryk prøvning

I en opstilling som denne er målingerne gennemført. Spændingen måles af en ± 250 kN vejecelle og tøjninger er målt med ± 1 mm/10mm ekstensometre som vist i Figur 2 og/eller strain gauges.

Statiske prøvninger.

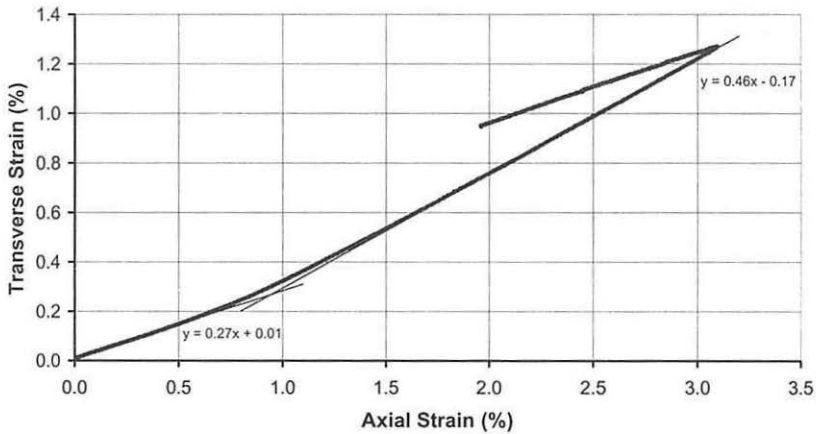
Standard trækprøver er foretaget med aksial ekstensometer til måling af den langsgående tøjning og med tværekstensometer til måling af tværkontraktionen. En træk hastighed på 0.01 mm/sek. er benyttet, svarende til en tøjningshastighed på $1,2 \cdot 10^{-4}$ til $5 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$. En typisk træk kurve er vist i Figur 3, og Figur 4 viser kurven med længde- og tværtøjning til bestemmelse af Poissons forhold.

Cal99-07



Figur 3. Træk arbejdskurve for CALMAX.

Poissons ratio



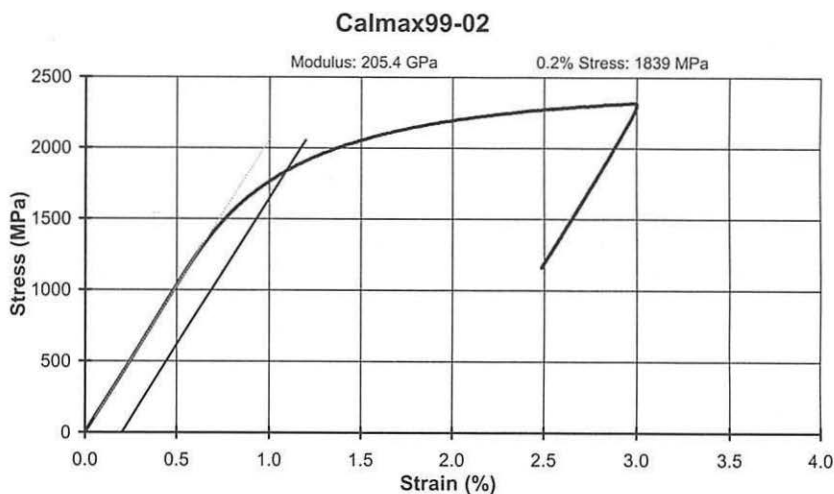
Figur 4. Aksial tøjning mod tværtøjning til bestemmelse af Poissons forhold.

Typiske målte træk værdier for CALMAX er

- E-modul = 201 GPa
- Poissons forhold = 0.27
- 0.2% Flydespænding = 1588 MPa

Deformationshærdningsforløb og ændringen i Poissons forhold som ses i Figur 3 og Figur 4 viser at de specielt interessante zoner for low cycle fatigue er overgangszoner, hvor der er begyndende plastisk deformation mellem proportionalitetsgrænsen og 0.2% spændingen, og hvor Poissons forhold går fra ca. 0.3 til ca. 0.5. Prøverne er ikke her trukket længere end ca. 3% tøjning, da deformationer udover dette område er uinteressant for levetidsmodellerne.

Tilsvarende er standard trykprøver foretaget til ca. 3 % deformation. Indenfor dette tøjningsområde kan stabiliteten af emnet holdes. Arbejdskurven er vist i Figur 5.



Figur 5. Enakset tryk-arbejdskurve for CALMAX.

Typiske målte værdier for CALMAX er

- E-modul = 204 GPa
- 0.2% Flydespænding = 1839 MPa

Udmattelsesprøvninger.

Den cykliske opførsel bestemmes under globale plastiske deformationer, dvs. under en generel plasticitet, hvilket kommer til udtryk ved en markant hysterese sløjfe i spænding versus tøjning. Området kaldes normalt low-cycle-fatigue, idet levetiderne ligger under 10000 cykliske belastninger.

Udmattelsesprøvningen har til formål under varierende belastninger at måle egenskabsændringer af betydning for skadesinitieringer og skadesudbredelser til endelig havari samt at bestemme det totale antal cykliske belastninger til brud. Det er således ikke tilstrækkeligt at bestemme en traditionel S-N kurve (Wöhler kurve) modelleret ved Manson-Coffin kurvefitning eller beskrive levetiden ud fra et Haigh diagram med Goodman eller Söderberg modeller [7]. Det er nødvendigt at følge spændings-tøjnings forholdene under hver belastningscyklus. Dette gøres ved ud fra den enkelte hysterese-sløjfe at bestemme maksimum og minimum værdierne samt dynamisk E-modul og plastisk arbejde. Heraf bestemmes bl.a. cykliske hærkning, blødgøring mm.

Det plastiske arbejde er reflekteret i tabsfaktoren i hysterese-sløjfen, svarende til forbruget af plastisk deformationsenergi i forhold til det elastiske arbejde i hver enkelt sløjfe, illustreret i Figur 6. Det plastiske arbejde pr. volumenenhed i en cyklisk belastning kan beregnes som

$$\Delta W = \int \sigma d\epsilon = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma(d\epsilon/dt) dt$$

Det elastiske arbejde pr volumenenhed kan beregnes ud fra

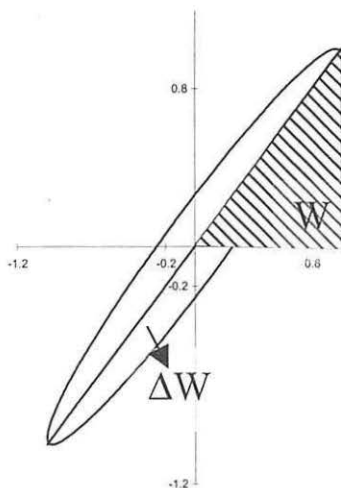
$$W = \frac{1}{2} \sigma_a \epsilon_a$$

σ_a og ϵ_a er hhv. spændings og tøjningsamplituderne.

Det specifikke plastiske arbejde udført pr. cyklus også kaldet *tabsfaktoren*, Ψ , er defineret som

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W}$$

Under belastninger med konstant spændingsamplituder vil deformationshærkningen normalt ændre tøjningsgrænserne således man ser et symmetrisk eller et usymmetrisk hær-



Figur 6. Definition af plastisk og elastisk arbejde.

ningsforløb. Dette giver sig til udtryk en større eller mindre hysterese-søjfe (cyklisk hær-dning/blødgøring) samt et generel flytning af søjfen (racketting). I Figur 7 er vist hvorledes maksimum og minimum tøjningsværdierne ændres i takt med antal cykliske belastninger. I Figur 8 er det relative hystereseareal vist som funktion af antal cykler. Det er relativt konstant under disse forhold. Flytningen af hysterese-søjfer ved cyklus 2 og cyklus 200 under udmattel-sesbelastningerne vist i Figur 17.

Under tilsvarende udmattelse ved konstant tøjningsamplitude ses hær-dningsforløbet i Figur 10. I forhold til tilsvarende belastningsniveau under konstant last ses det, at der her er mindre cyklisk hær-dning og at en mætningsniveau hurtigt nås. Det sidste understreger betyd-ningen af en nøjagtig måling af specielt de første cykliske forløb. I Figur 11 er det relative hystereseareal vist som funktion af antal cykler. Det er påvirket af hær-dningsforløbet i de før-ste cykler men bliver derpå konstant som under konstant spændingskontrolleret udmattelse. Figur 9 viser flytningen af hysterese-søjfe nr. 200 i forhold til starten.

Under tilsvarende udmattelse ved konstant tøjningsamplitude og forskudt middelværdi (ændret R-forhold) ses hær-dningsforløbet i Figur 13. Der ses her en kraftig ændring i maxi-mum og minimum spændingsværdier og der er en klar cyklisk hær-dning i materialet. Det ses dog også her, at en mætningsniveau hurtigt nås. I Figur 14 er det relative hystereseareal vist som funktion af antal cykler. Det er her meget kraftigere påvirket af hær-dningsforløbet end under udmattelse ved $R=-1$ og bliver ikke konstant (bemærk at skaleringer er forskellig fra skaleringerne i Figur 8 og Figur 11. Figur 12 viser flytningen af hysterese-søjfe nr. 200 i for-hold til starten.

Et specielt udmattelsesforhold er er kontrolleret plastisk tøjning. Set ud fra et materia-lemæssigt mikrostrukturelt synspunkt viser det sig at de grundlæggende mekanismer er styret af lokale plastiske tøjninger [8]. Disse målinger for CALMAX viser også en betydelig æn-dring i hysterese-søjferne og som vist i Figur 16 er det både optimum værdierne i tøjning og spænding der flyttes. Der er både en isotropisk og en kinematisk hær-dning. Dette ses også af ændringer i hysterese-søjfernes position i spændings-tøjningsfeltet som illustreret i Figur 15. Der er endnu ikke udført mange af den slags målinger på industrielle materialer, så her er da-tamængden begrænset. Men fremtidigt arbejde vil også fokusere på den del.

Som de to sidste illustrationer er vist forskellene i hysterese-søjferne når der udmattel-sestestes med de her omtalte parametre. Figur 18 viser forskellene i hysterese søjfer nr. 2 og Figur 19 i hysterese-søjfer nr 200 under belastningsforhold, der nominelt giver samme levetid. Dette illustrerer kompleksiteten i disse undersøgelser.

Afslutning.

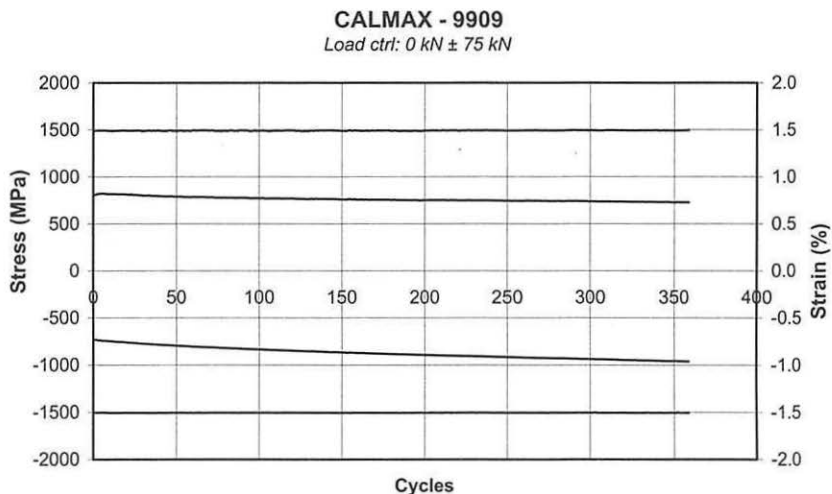
Her er vist eksempler på de parametre der er nødvendige at kende, når cyklisk plasticitet skal modelleres efter kontinuummekaniske metoder. De tests, der er beskrevet i denne artikel illustrere blot nogle af de nødvendige parameterområder. En fuld kortlægning indebærer at

- amplituderne varieres
- middelværdierne varieres
- indflydelsen af temperaturen og frekvensen fastlægges
- revneinitieringsforløb og revnevækstforløb kortlægges

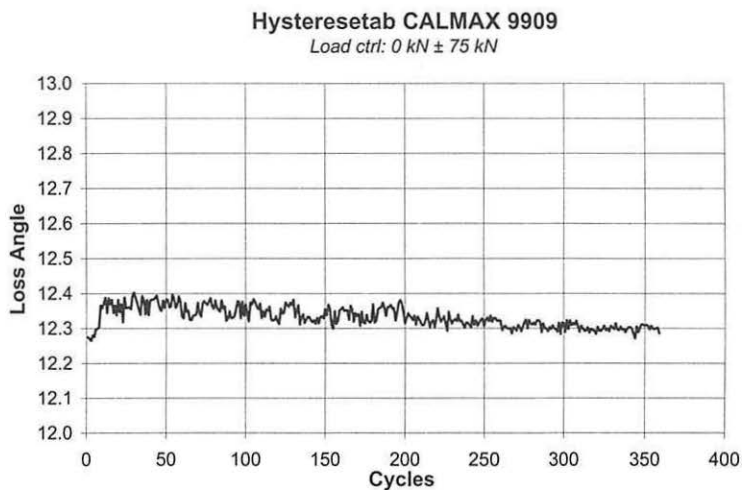
Tages alt dette med i forsøgsplanerne bliver testmatricen næsten uendelig stor. Derfor er det nødvendigt nærmere at få fastlagt

- modellens følsomhed overfor de enkelte parametre
- mikrostrukturens indflydelse på de enkelte parametre

Dette arbejde er i gang og det er målet for de kommende års forskning og udvikling indenfor området at få en grundlæggende forståelse for materialernes respons overfor cykliske belastninger og at anvende dette kendskab til materialerne i den industrielle dimensionerings- og designrettede modellering der foregår og er under fortsat udvikling.

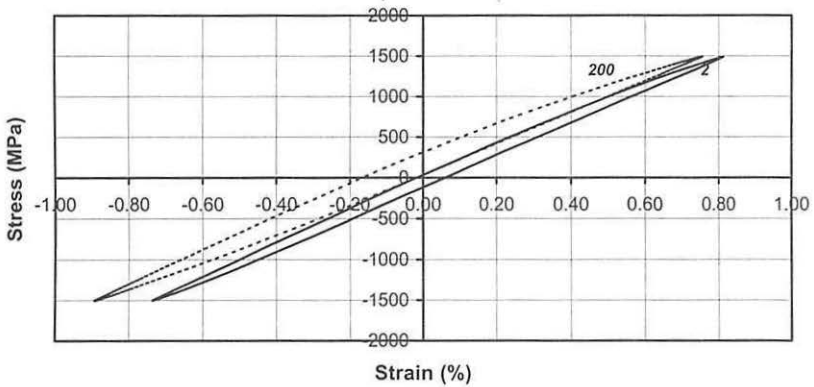


Figur 7. Cykliske maksimum og minimumsværdier under belastningen med konstant spændingsamplitude.



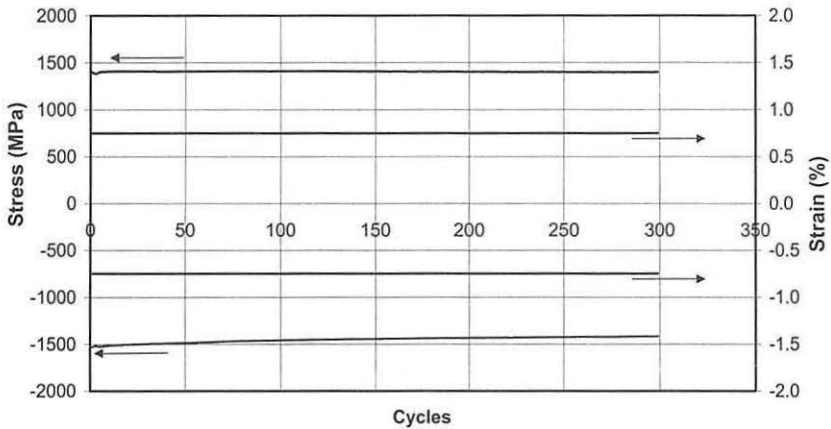
Figur 8. Hysteresecarealet i forhold til det elastiske arbejde i hver enkelt belastningscyklus. .

CALMAX (9909)
 Const. load: $0 \pm 75 \text{ kN}$
 Cycle 2 og Cycle 200



Figur 9. Flytningen af hysteresesøjferne illustreret ved forskellen mellem cyklus nr. 2 og cyklus nr. 200 ved udmattelse under konstant spændingsamplitude.

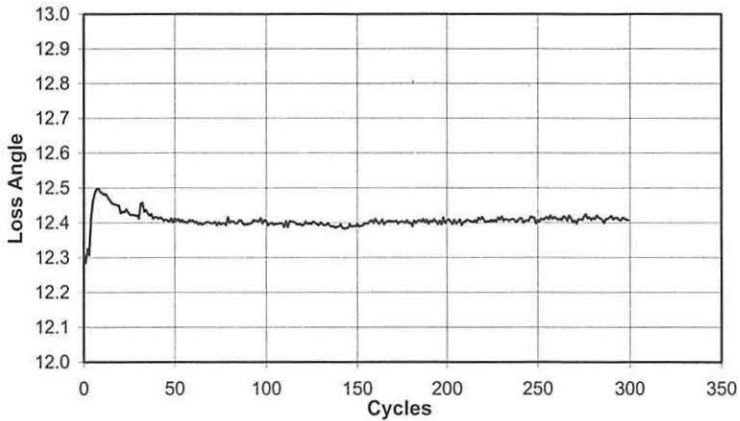
CALMAX - 9910
 Strn ctrl: $0 \pm 0.75\%$



Figur 10. Cykliske maksimum og minimumsværdier under belastning med konstant tøjningsamplitude.

Hysteresetab CALMAX 9910

Strm ctrl: $0 \pm 0.75\%$

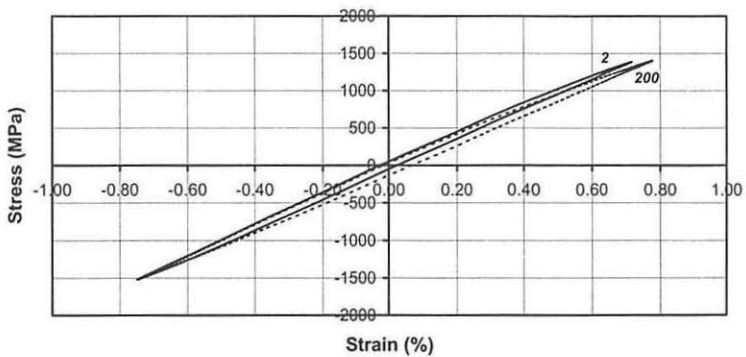


Figur 11. Hystereserearealet i forhold til det elastiske arbejde i hver enkelt belastningscyklus.

CALMAX (9910)

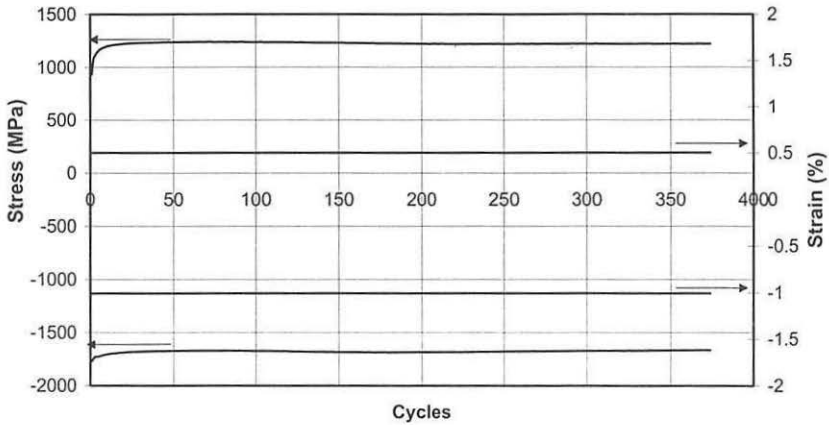
Const. strn.: $0 \pm 0.75\%$

Cycle 2 og Cycle 200



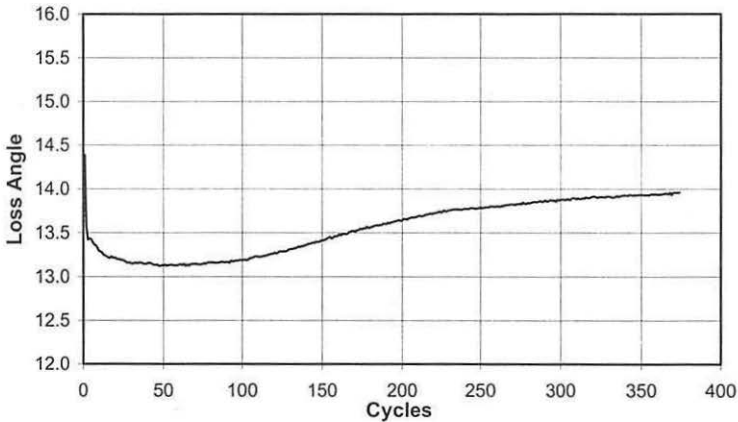
Figur 12. Flytningen af hysteresesløjferne illustreret ved forskellen mellem cyklus nr. 2 og cyklus nr. 200 ved udmattelse under konstant tøjningsamplitude.

CALMAX - 9911
Strn ctrl: -0.25%±0.75%



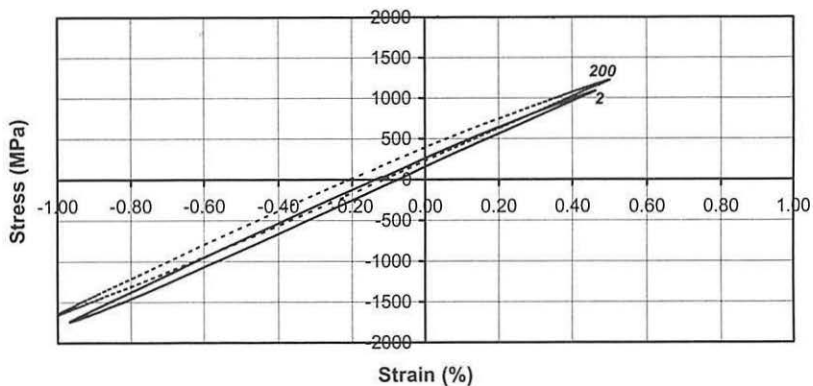
Figur 13. Cykliske maksimum og minimumsværdier under belastning med konstant tøjningsamplitude og forskudt middelværdi.

Hysteresetab CALMAX 9911
Strn ctrl: -0.25%±0.75%



Figur 14. Hysteresecarealet i forhold til det elastiske arbejde i hver enkelt belastningscyklus.

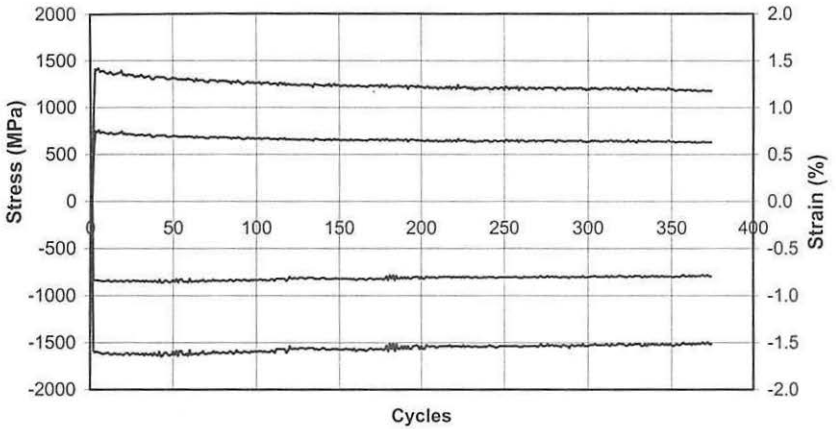
CALMAX (9911)
Const. strn.: $-0.25 \pm 0.75 \%$
Cycle 2 og Cycle 200



Figur 15. Flytningen af hysteresesløjferne illustreret ved forskellen mellem cyklus nr. 2 og cyklus nr. 200 ved udmattelse under konstant tøjningsamplitude og forskudt middelværdi.

CALMAX - 9906

Pl. strn. ctrl: $\pm 0.05\%$

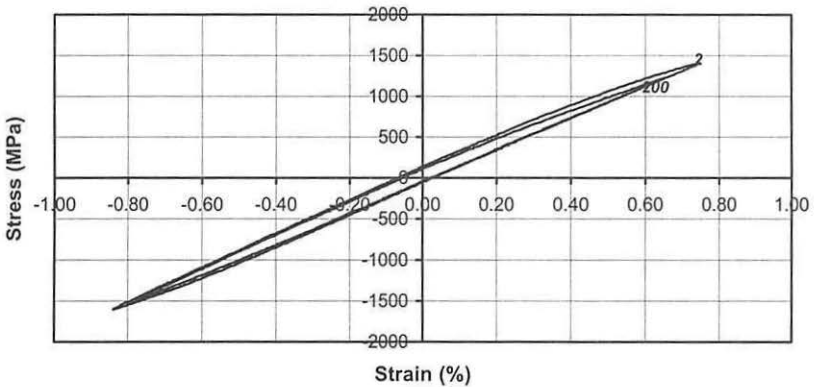


Figur 16. Cykliske maksimum og minimumsværdier under belastning med konstant plastisk tøjningsamplitude.

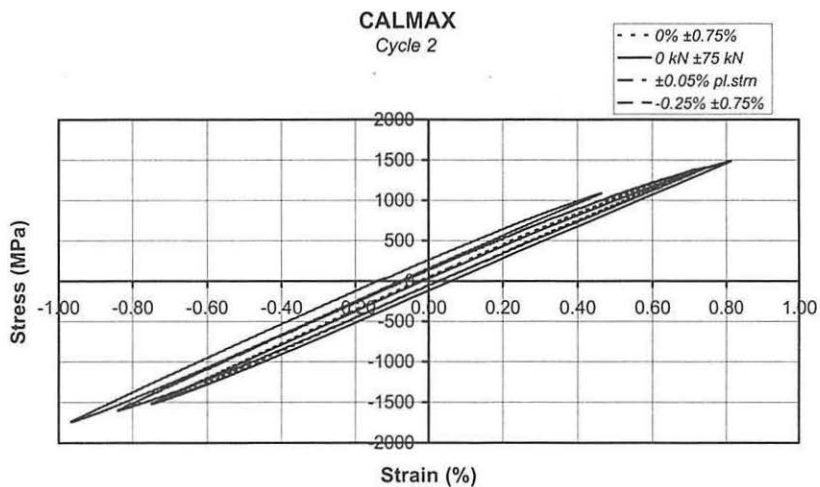
CALMAX (9906)

Const. pl. strn: 0.05%

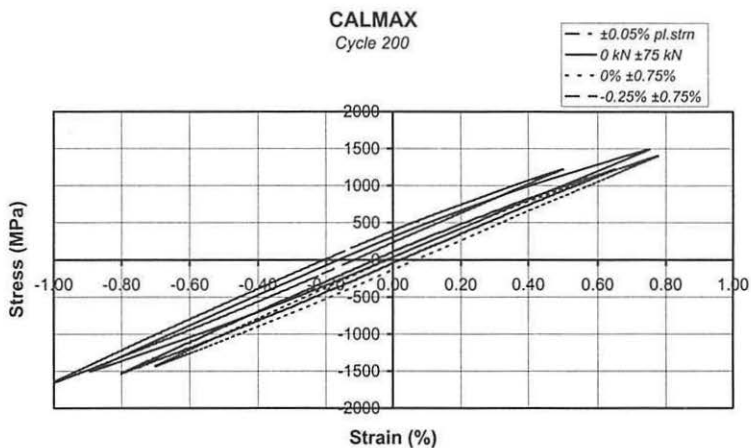
Cycle 2 og Cycle 200



Figur 17. Flytningen af hysteresesløjferne illustreret ved forskellen mellem cyklus nr. 2 og cyklus nr. 200 ved udmattelse under konstant plastisk tøjningsamplitude.



Figur 18. Sammenligninger mellem hysteresløjfer ved cyklus nr. 2 for de forskellige belastningsforhold.



Figur 19. Sammenligninger mellem hysteresløjfer ved cyklus nr. 200 for de forskellige belastningsforhold.

Referencer.

[1] Petersen, Thomas Ørts. Numerical Modelling og Cyclic Plasticity and Fatigue Damage in Cold-Forging Tools. I Materialers Egenskaber - Modellering, Måling, Anvendelse. red. Povl Brøndsted. Dansk Metallurgisk Selskab, Vintermødet, Sorø, Januar 2000. ISBN 87-87535-29-7

[2] Grønbær, Jens. Anvendelse af cykliske materialedata til dimensionering af båndarmede koldflydeværktøjer. I Materialers Egenskaber - Modellering, Måling, Anvendelse. Red. Povl Brøndsted. Dansk Metallurgisk Selskab, Vintermødet, Sorø, Januar 2000. ISBN 87-87535-29-7

[3] Skov-Hansen, Peder. Brudmekanisk undersøgelse af værktøjsmaterialer. M.Sc. Afhandling. Institut for Produktion, Danmarks Tekniske Universitet, MM-rapport nr. 96, 1996

[4] Pedersen, Thomas Ørts. Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue in Tool Materials. Ph.D. Thesis. Institute for Solid Mechanics. The Technical University of Denmark. DCAMM report no. 582. 1998.

[5] Brøndsted, P., Peder Skov-Hansen. Fatigue Properties of High Strength Materials used in Cold-Forging Tools. Int. Journal of Fatigue. 20 (5), 1998, pp. 373-381

[6] Skov-Hansen, Peder, Niels Bay, Jens Grønbæk, Povl Brøndsted. Fatigue in Cold-Forging Dies: Tool Life Analysis. Materials Processing Technology, 95, 1999, pp. 40-48

[7] Brøndsted, Povl. Analytiske materialemodeller. I Pladematerialer – Formgivning, Struktur og Egenskaber. Red. Povl Brøndsted, Kirsten Grønning Sørensen. Dansk Metallurgisk Selskab, Vintermødet, Grenå, Januar 1997. ISBN 87-87535-26-2

[8] Carstensen, Jesper Vejøl. Udmattelsesmekanismer i metaller og legeringer. I Materialers Egenskaber - Modellering, Måling, Anvendelse. Red. Povl Brøndsted. Dansk Metallurgisk Selskab, Vintermødet, Sorø, Januar 2000. ISBN 87-87535-29-7