



Korrosionscentralen



Finite element beregninger til korrektion af målinger af restspændingsprofiler ved hjælp af røntgendiffraktion.

Thomas Fich Pedersen

Civilingeniør

Korrosionscentralen, ATV

Park Alle 345

2605 Brøndby

og

Inge L.H. Hansson

Tekn. dr, Docent

Laboratoriet for Teknisk Fysik

Danmarks Tekniske Højskole

Bygning 307

2800 Lyngby

Dansk Metallurgisk Selskabs Vintermøde 1989.

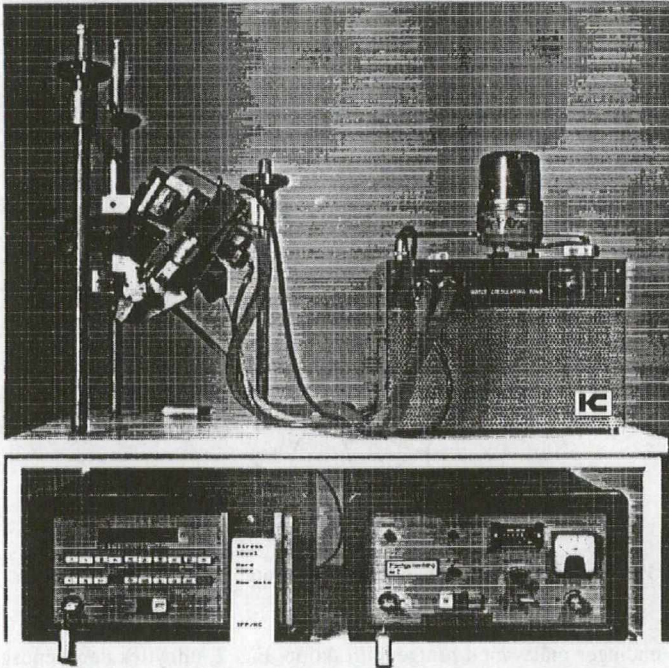
RESUME

Restspændinger i komponenter, som udsættes for f.eks. udmattelsesbelastninger, kan nedsætte komponentens levetid betydeligt. Dette problem kan der kun gøres noget ved, hvis restspændingerne kan måles. Restspændinger kan bl.a. måles ved hjælp af røtgendiffraktion, men kun i de aller yderste lag af materialet (ca. 10 μm). For at måle dybere må materiale altså fjernes, men ved at fjerne materiale med spændinger i ændres spændingsfordelingen i det resterende materiale. Dette må målingerne så korrigeres for. Der findes idag to metoder til denne korrigerings: en metode baseret på elastisk bjælketeori, og en baseret på Finite Element beregninger. Den sidste, som er udviklet af forfatterne til dette indlæg, er gennemgået nedenfor. Resultaterne viser en betydelig forskel i størrelsen af korrektionen beregnet ved hjælp af de to metoder. Ikke mindst ved måling af restspændinger i belægninger med afvigende elastiske egenskaber fra substratmaterialet har det overordentlig stor betydning.

INDLEDNING

Restspændinger eller indre spændinger er, som ordet antyder, spændinger, som eksisterer i et materiale uden at dette er påvirket af ydre kræfter. De fremkommer når et materiale bliver plastisk deformeret og/eller udsættes for store temperaturgradienter. De kan også fremkomme som følge af fase transformationer, når dele af materialet ændrer specifikt volumen. Ved svejsning for eksempel dannes der restspændinger når det lokalt smeltede materiale størkner samtidig med, at der er en kraftig temperaturgradient omkring svejsningen. Ved en proces som "shot-peening", hvor overfladen bombarderes med kugler, deformeres de yderste lag af materialet meget kraftigt plastisk og derved opnås en meget stor tryk-restspænding i overfladen, hvorved komponentens udmattelsesstyrke forøges. Ved en ikke-mekanisk behandlingsmetode som f.eks. indsatshærdning fås både en hærdning af det yderste lag, samtidig med at der dannes store trykspændinger i overfladen. Her fremkommer restspændingerne som følge af det ekstra kulstof, som presses ind i atomgitteret. Endelig giver stort set alle overfladebehandlingsmetoder fra slibning, polering og fræsning til avancerede metoder som laserbehandling o.lign. anledning til forskellige former for restspændinger. I den praktiske brug af komponenter indeholdende restspændinger kan de blive et problem, for de adderes til de ydre belastninger som komponenten ellers oplever. I de ekstreme tilfælde kan restspændingerne være af samme størrelsesorden som materialets flydespænding, og hvis de er trækspændinger, betyder det at komponentens udmattelsesstyrke kan blive væsentligt nedsat.

I de fleste processer hvor restspændingerne er et produkt af plastisk deformation, og det er i praksis de fleste, vil der forekomme spændingsgradienter, dvs. variationer af spændingen med dybden ind i materialet. For at kunne bedømme den skadelige effekt af restspændingen (eller den styrkeforøgende effekt for den sags skyld), er det vigtigt at kunne måle disse gradienter. Når restspændinger måles ved diffraktion af langbølget røntgenstråling (Korrosionscentralens specialudstyr til restspændingsmåling, Fig. 1,



σ
 Laser-smelt
 kontraktion
 i basismetall

Fig. 1. Korrosionscentralens transportable specialudstyr til restspændingsmålinger v.h.a. røntgendiffraktion.

anvender Cr-K α stråling med en bølgelængde på 0,229 nm), måles spændingen kun ned til en dybde af ca. 10 μ m, så for at måle spændinggradienter med denne metode, er det nødvendigt at fjerne materiale med indre spændinger mellem målingerne. Herved ændres hele spændingsfordelingen som følge af relaxeringen. Målingerne må derfor korrigeres for denne ændring, og til dette formål er der nu to metoder til rådighed. Den ene er en metode, som er baseret på simpel elastisk bjælketeori, og den anden, som vil blive behandlet i denne artikel, er baseret på beregninger ved hjælp af Finite Element Metoden (FEM).

MÅLING AF RESTSPÆNDINGER V.H.A. RØNTGENDIFFRAKTION.

Der er idag kun nogle få metoder, som kan måle restspændinger ikke-destruktivt. Disse er røntgendiffraktion, neutron diffraktion og en magnetoelastisk metode, som bygger på

måling af "Barkhausen noise". Derudover er en ultralydmetode under udvikling, men den er kun i begrænset omfang blevet brugt til praktiske målinger.

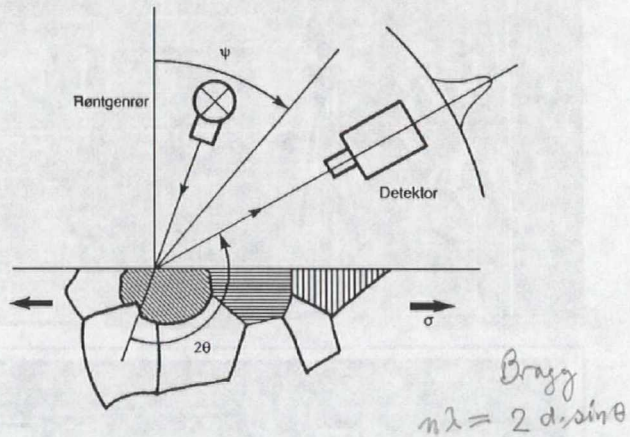


Fig. 2. Princippet i restspændingsmåling ved røntgendiffraction.

Når restspændinger måles med røntgendiffraction, Fig. 2, udnyttes den kendsgerning at de yderste lag af materialet, hvorfra de langbølgede røntgenstråler diffrakteres, er i plan spændingstilstand. Det vil sige, at alle spændingskomponenter virkende vinkelret på overfladen er nul. Ved røntgendiffraction måles afstanden mellem gitterplanerne i krystallen, og ved at måle afstanden i retningen vinkelret på overfladen og i forskellige vinkler, i forhold til overfladen, kan spændingen i overfladen beregnes. Ved at kombinere Braggs lov for diffraction og Hookes lov for plan spændingstilstand fås følgende udtryk for spændingen:

$$\sigma = \frac{-E}{2(1+\nu)} \cot \theta \frac{d(2\theta)}{d(\sin^2 \psi)}$$

σ er spændingen

E er elasticitetsmodulen

ν er Poissons forhold

θ er diffraktionsvinklen

ψ er vinklen mellem måleretningen og overfladenormalen

i stål måles de yderste 10 µm

KORREKTIONSMETODER

Baggrunden for det arbejde, som er beskrevet her, er behovet for at måle restspændingsprofiler ved hjælp af røntgendiffraction. For at kunne måle spændingen som funktion af dybden ind i materialet er det nødvendigt successivt at fjerne materiale og gentage målingerne. Når materiale indeholdende spændinger fjernes, er det resterende materiale ikke længere i ligevægt, og spændingsfordelingen i resten af materialet ændrer sig derfor for at genoprette ligevægten. For at beregne den oprindelige spænding i materialet ud fra profilmålinger er der derfor nødvendigt at korrigere for denne ændring.

SIMPEL KORREKTIONSMETODE

En simpel korrektionmetode, som først blev udledt af Moore og Evans¹ bygger på, at relaxeringen sker i form af en elastisk bjælkebøjning. Den antager med andre ord at relaxationspændingen har form af en retlinet spændingsfordeling over tværsnittet af det resterende materiale. Denne spændingsfordeling skal numerisk have den samme samlede kraft og det samme samlede moment som spændingen i det fjernede materiale, men med modsat fortegn, for at genoprette ligevægten. Moore og Evans kom frem til følgende udtryk for den sande spændingsfordeling i en plade:

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + 2 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z)}{z} dz - 6 z_1 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z)}{z^2} dz$$

z_1 er afstanden fra bunden af pladen til den nye overflade

H er den oprindelige tykkelse

σ er den sande spænding

σ_m er den målte spænding

Denne formel forudsætter imidlertid, at hele overfladelaget fjernes, hvilket sjældent er tilfældet ved praktiske målinger. Materialet fjernes normalt ved elektrolytisk polering, fordi denne metode ikke indfører nogle nye spændinger. Ved denne poleringsmetode fjernes materialet således, at der fremkommer et (sædvanligvis cylindrisk) hul, snarere end at hele overfladelaget bliver fjernet. For at tage hensyn til dette blev den følgende korrektionsmetode udviklet.

se skitse s 241

FEM BASERET KORREKTIONSMETODE

Formålet med denne undersøgelse er at beregne spændingskorrektionen for en mere realistisk situation, end den som forudsættes ved den simple korrektionsmetode, og til dette formål er formuleret en mere omfattende model end den enkle bjælkemodel. For det første forudsættes det ikke, at hele overfladen fjernes ved poleringen, og for det andet er der heller ingen forudsætning om at pladen skal opføre sig som en klassisk bjælke. For det tredje er problemet med belægninger af et materiale med afvigende elastiske egenskaber fra substratet blevet undersøgt, fordi det netop i dette tilfælde er meget vigtigt at restspændinger måles korrekt. Et vigtigt incitament til påbegyndelsen af disse beregninger har netop været problemer med at måle restspændingsprofiler i belægninger pålagt ved hjælp af laseropsmeltning. Beregningerne er udført ved hjælp af Finite Element Metoden (FEM) på en mikrocomputer og der blev anvendt et kommercielt FEM-programmel fra MacNeal-Schwendler, MSC-PAL2, som er udviklet til beregning af lineære elastiske problemer. Målet med arbejdet er at simulere situationen med et cylindrisk hul, hvilket kræver en fuld tredimensional analyse, men som en første simplificering af problemet blev beregningerne foretaget på den to-dimensionale analogi - en rille.

Modellen, Fig. 3, som blev anvendt ved beregningerne, blev designet som en plade med dimensionerne $L \times H \times T = 20 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. Rillen blev placeret i modellens symmetriakse således at beregningerne kun bliver foretaget på modellens ene halvdel, som er $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$.

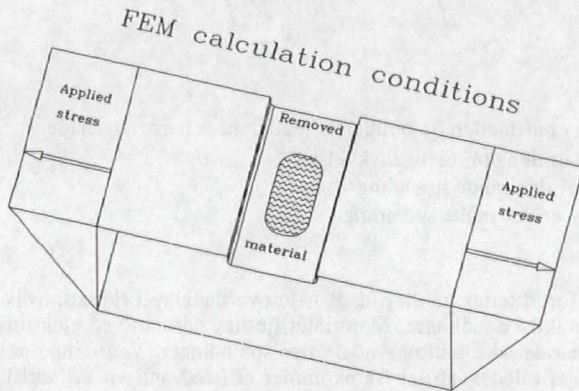


Fig. 3. Den anvendte model ved FEM beregningerne. Dimensionerne er $L \times H \times T = 20 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ med spændingen fra 0 til 100 MPa.

I den øverste del af modellen, Fig. 4a, og omkring kanten af rillen er elementnetværket gjort finere for at undgå diskontinuiteter i tøjningen på grund af de skarpe spændingsgradienter omkring kærven i rillen. Netværket omkring kanten af rillen er vist i Fig. 4b. For at simulere et hul dannet ved elektropolering bedst muligt er hjørnet af rillen blevet skåret skråt af. Dette reducerer også kærveffekten omkring kanten. Modellen belastes med en trekantformet spændingsfordeling på kanten længst væk fra symmetriaksen, i en retning vinkelret på symmetriaksen. Spændingen er 0 MPa nederst på modellen og stiger lineært til 100 MPa ved den øverste kant. Modellens udseende og den påførte belastning er illustreret i Fig. 3. Denne spændingsfordeling resulterer i en tilsvarende spændingsfordeling på symmetriaksen i modellen uden rillen. Samme belastning blev herefter påført 10 andre modeller med forskellige dybder af rillen rækkende fra 0.1 til 1.0 mm og med en halvbredde på 2.5 mm. Materialeegenskaberne, som blev brugt ved beregningerne, stammer fra rustfrit stål med en elasticitetsmodul på 210 GPa og et tværkontraktionstal (Poissons forhold) på 0,29.

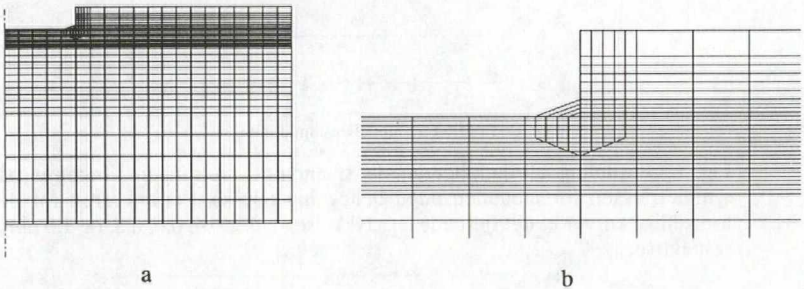
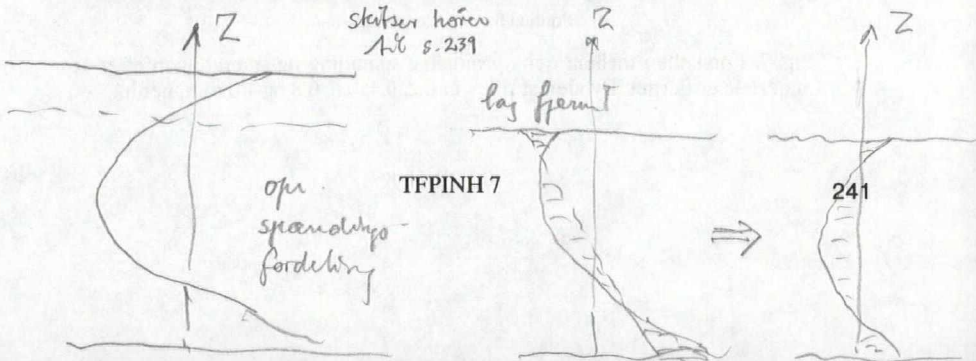


Fig. 4. Elementnetværket for FEM beregningerne, a) hele modellen, b) detaljer omkring kanten af rillen.

Da restspændinger meget ofte forekommer i forbindelse med belægninger af et materiale med termiske og elastiske egenskaber, som afviger fra grundmaterialets, blev der også foretaget beregninger på modeller, hvor de øverste 0.5 mm blev erstattet med et andet materiale, titan, med en elasticitetsmodul på 120 GPa og Poissons forhold 0,36.



RESULTATER

Resultaterne af beregningerne i form af fordelingen af den beregnede spænding i retningen vinkelret på symmetriaksen er vist i Fig. 6 for modellen uden belægning. Den simple bjælketeori ville her give en lineær fordeling, men på grund af kærveffekten omkring hjørnet af rillen og påvirkningen fra det resterende materiale ved siden af rillen er fordelingen ikke lineær i FEM-modellen.

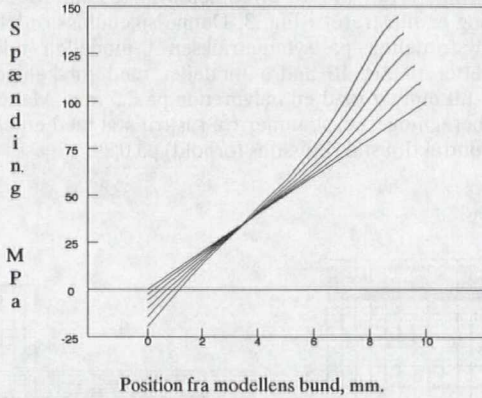


Fig. 6. Fordeling af den beregnede spænding i retningen vinkelret på symmetriaksen for modellen uden belægning (Bulk). Parameteren for de forskellige kurver er det fjernede lags tykkelse, 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, og 1,0 mm, respektive.

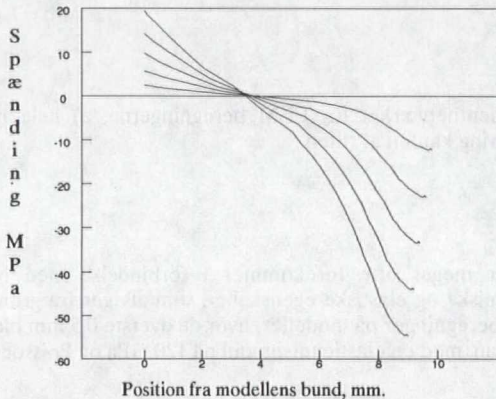


Fig. 7. Forskellen mellem den oprindelige spænding og spændingen efter at materiale er fjernet. Dybden af rillen er 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 og 1,0 mm, henh.

I Fig. 7 er vist forskellen mellem den oprindelige spænding og spændingen efter at materiale er fjernet for forskellige dybder af rillen. Det ses tydeligt, at denne forskel afviger mest fra den lineære fordeling i den øverste del af modellen tæt på den overflade hvorpå spændingerne faktisk måles. Denne forskel på overfladen, som er den korrektion der skal anvendes ved måling, er vist i Fig. 8 som funktion af rillens dybde, både for FEM-modellen og for den simple bjælketeori. Dette resultat viser at hullet har en væsentlig betydning for størrelsen af korrektionen, som er op til 5% af den oprindelige spænding større end hvis hele overfladen var fjernet. Fordi FEM-metoden bygger på lineær elasticitetsteori kan resultaterne også udtrykkes som korrektionen i procent af den oprindelige spænding. Det er dog vigtigt at bemærke, at dette kun gælder for denne type af spændingsfordeling, altså en simpel spændingsgradient.

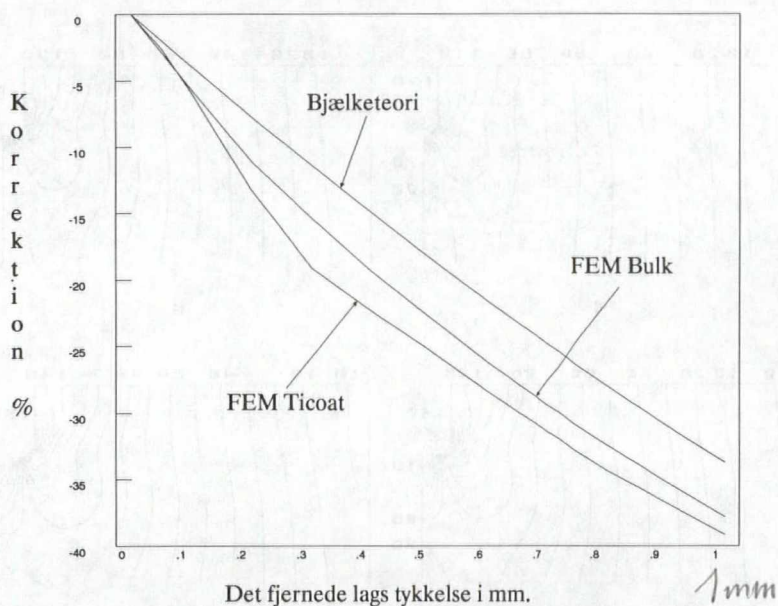


Fig. 8. Korrektion i procent af den målte spænding for den simple bjælketeori og for de FEM beregnede spændingsfordelinger.

For at tydeliggøre effekten af rillen er fordelingen af von Mises spændingen tegnet op som konturkort i Fig. 9. Symmetriaksen er her vist øverst i figuren. Konturerne angiver linier hvor spændingen er ens. Konturerne er tegnet for hver 10 MPa spring i von Mises spændingen og der er vist konturer for spænding fra 0 MPa til 200 MPa.

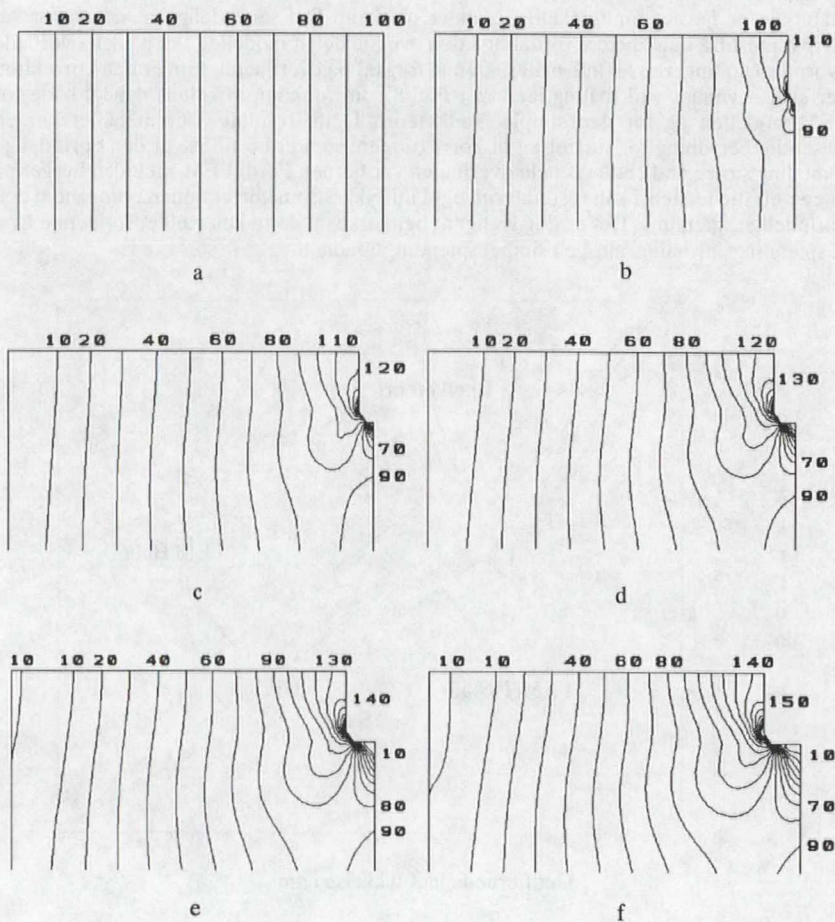


Fig. 9. FEM-beregnete von Mises spændingsfordelinger for Bulk modellen med den påtvungne spænding fra 0 MPa til 100 MPa. Figurerne viser iso-spændingslinier med trin på 10 MPa. Parameteren i de forskellige figurer er det fjernede lags tykkelse med a) 0 mm, b) 0.2 mm, c) 0.4 mm, d) 0.6 mm, e) 0.8 mm and f) 1.0 mm, respektive.

Tilsvarende beregninger er også udført for modeller hvor materialeegenskaberne i de øverste 0,5 mm er ændret til titans. Den effekt dette har på spændingsfordelingen er vist i Fig. 10. Det er værd at lægge mærke til, at selv om den pålagte spændingsfordeling er den samme på højre kant af modellen, bliver spændingen i det øverste lag, i belægningen og et stykke ind i grundmaterialet, mindre i symmetriaksen.

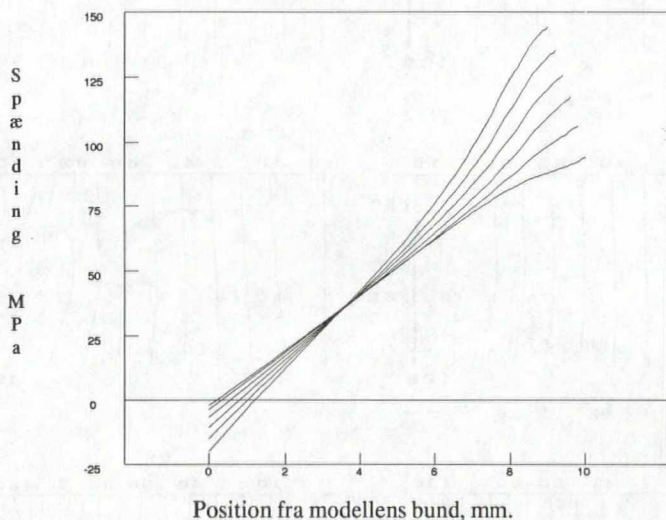


Fig 10. Fordeling af den beregnede spænding i retningen vinkelret på symmetriaksen for modellen med 0.5 mm Ti-belægning (Ti-coat). Parameteren for de forskellige kurver er det fjernede lags tykkelse, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, og 1.0 mm, respektive.

Kurver over korrektionen er vist i Fig. 8 for både den simple bjælke teori og for modellen med titan belægning (herefter kaldet Ti-coat modellen) og uden titan-belægning (herefter kaldet bulk-modellen). I Fig. 11 vises konturkortene over von Mises spændingen svarende til figurerne for modellen uden belægning. Den FEM-beregnete korrektion for den titan belagte model kan opdeles i tre områder, som er karakteriserede ved den mekanisme, som er mest afgørende for korrektionens størrelse. I område 1, som strækker sig fra overfladen til ca. 0,1 mm ind i materialet, er det belægningsmaterialets elasticitetsmodul, eller dets evne til at optage kræfter, som er den afgørende faktor. Derfor er korrektionen her for en titanbelægning noget mindre, end den er for modellen uden titan belægning. I område 2, som omfatter resten af belægningens tykkelse,

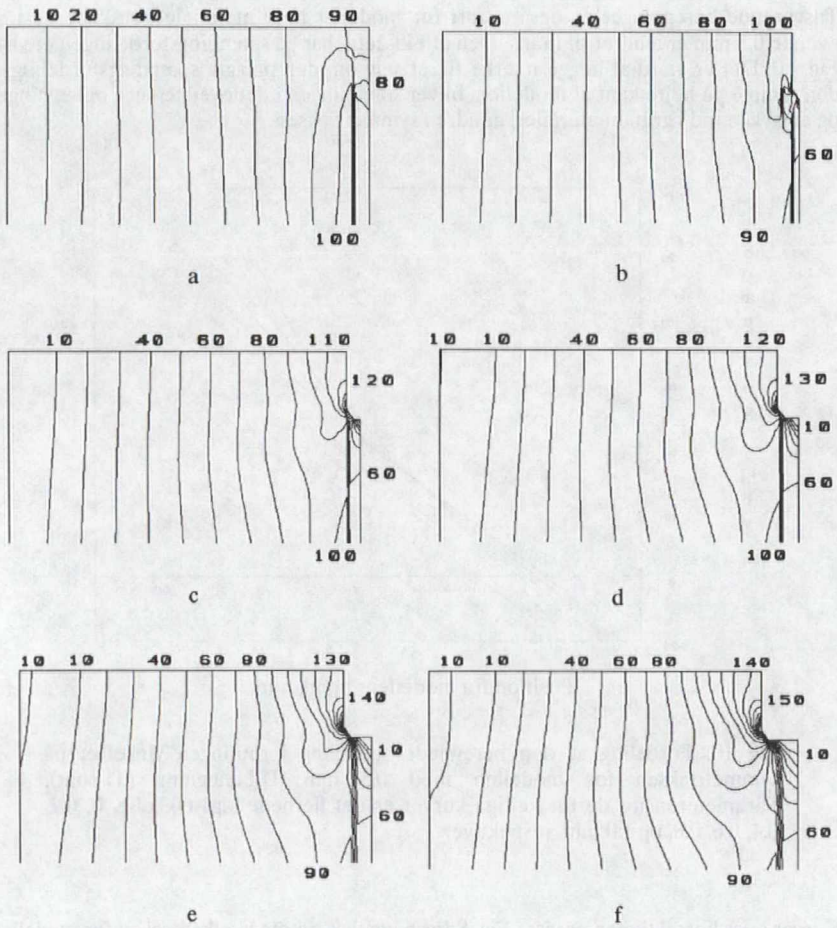


Fig. 11. FEM-beregnete von Mises spændingsfordelinger for Ti-coat modellen med 0.5 mm Ti på stål og med den påtvungne spænding fra 0 MPa til 100 MPa. Figureerne viser iso-spændingslinier med trin på 10 MPa. Parameteren i de forskellige figurer er det fjernede lags tykkelse med a) 0 mm, b) 0.2 mm, c) 0.4 mm, d) 0.6 mm, e) 0.8 mm and f) 1.0 mm, respektive.

de største restspændinger er hidtil målt i keramiske belægnings, indtil 1500 MPa.

begynder kærveffekten at blive mere betydningsfuld, og her er forskellen mellem bulk-modellen og Ti-coat modellen maksimal. Resten af modellen udgør område 3. Forskellen mellem bulk-modellen og Ti-coat modellen bliver her konstant, og i dette område er det området ved siden af rillen, som har den afgørende indflydelse. Titan, med en lavere elasticitetskonstant end stål, optager ikke så meget af deformationsenergien, og korrektionen bliver derfor større. Forskellen er næsten konstant så længe rillens dybde ikke er for stor i forhold til den totale tykkelse af modellen.

KONKLUSION

Resultaterne af disse beregninger er meget betydningsfulde for fremtidig måling af restspændingsprofiler ved hjælp af røntgendiffraction. Som det ses, er der især når der er tale om belægnings med elastiske egenskaber afvigende fra grundmaterialets, meget stor forskel på den simple korrektionsmetode og den FEM baserede beregning. Spændingsmåling i belægnings af forskellig art bliver mere og mere betydningsfuld, efterhånden som der udvikles nye belægningsmetoder som cladding og oplegering ved hjælp af laserstråling, plasmaspøjtning o.s.v.. For at kunne verificere sådanne belægnings vedhæftning, slidstyrke og udmattelsesstyrke, er det vigtigt at kende restspændingsfordelingen i dem, og disse beregninger kan derfor få stor betydning i dette arbejde. Det er ikke helt klart om korrektionen har samme størrelse (i %), hvis spændingsfordelingen har en anden form, og naturligvis vil den aktuelle geometri have en afgørende indflydelse. Imidlertid er hverken den nødvendige regnetid eller prisen på det anvendte udstyr så store at det umuliggør beregninger for mere komplicerede geometrier, og metoden kan derfor bruges også i specialtilfælde.

AFSLUTNING

Som afslutning skal takkes for økonomisk støtte til gennemførelse af dette arbejde fra Statens Teknisk Videnskabelige Forskningsråd, J. nr. 5.17.7.6.37, og fra Nordisk Industrifond, projekt P86051, i forbindelse med projektet "Laser overfladebehandlede Materialer". MT-Data takkes for bistand med praktiske forslag til figurpræsentation fra MSC-PAL2 til Ventura.

LITTERATUR

1. Moore, M.G., Evans, W.P., Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis. SAE Transactions, vol 66, 1958, p. 340.
2. Noyan, I.C. og Cohen, J.B. "Residual Stress" Springer Verlag, New York, 1987, p.233.

3. Macherauch, E. "Introduction to Residual Stress" in Advances in Surface Treatments, ed. A. Niku-Lari, Pergamon Press, Oxford, 1987.
4. Larsson, L.E., Sandstrom, R., Method for evaluation of the 3 D residual stress field from X-ray diffraction measurements on heavy weldments. Rapport IM-1666, Inst. for Metalforskning, Stockholm, 1982.
5. Pedersen, T.F. og Hansson, C.M.: "Restspændingsmåling med røntgendiffraction. Teori og anvendelse." STVF-rapport, J. nr. 5.17.7.6.06, 1988.
6. Cullity, B.D. "Elements of x-ray diffraction" 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, 1978, p.447ff