



FORCE
INSTITUTTET

SHOT PEENING AF AUSTENITISK RUSTFRIT STÅL

Hans Peter Nielsen
FORCE Institutet, Brøndby

ABSTRACT

Shot peening is a cold working process mainly used to improve the fatigue properties and the resistance to stress corrosion cracking of metallic parts.

This paper presents the results of fatigue tests (rotary bending) and stress corrosion tests (constant load) performed in the laboratory with shot peened and untreated specimens of 18/8 stainless steel. Shots of stainless steel, glass and zirconium oxide were used as peening media.

The results of the tests showed that the fatigue life could be extended by a factor of 500 or more and the endurance limit could be increased to levels above the yield strength of the material.

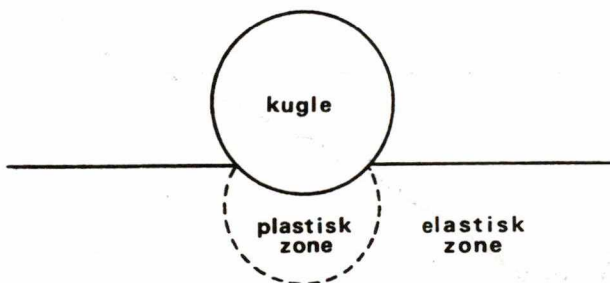
Also the resistance to stress corrosion cracking was increased by shot peening. The maximum load which could be applied without cracking was 5-6 times higher with the shot peened specimens.

INTRODUKTION

Shot peening er en koldbearbejdningsproces, der primært har til formål at forbedre udmattelsesegenskaberne og øge resistensen mod spændingskorrosion af metalliske emner. Processen benyttes også til at modvirke interkrystallinsk korrosion [1], [2], til formgivnings- og retteoperationer [3], til forbedring af slid- og smøreegenskaber og til at øge resistensen mod kavitationserosion [4]. Det er imidlertid med det formål at forbedre udmattelsesegenskaberne, at shot peening-processen til dato er blevet mest benyttet.

Under shot peening-processen bombarderes emnets overflade med små kugler med en relativ ensartet diameter, der normalt ligger mellem 0,2 og 2 mm. Kuglerne er fremstillet af stål, rustfrit stål, glas eller keramik. Kuglerne accelereres med slynghjul eller trykluft.

Idet den enkelte indkommende kugle rammer overfladen, sker der plastisk deformation inden for et område, som vist skematisk på figur 1.



Figur 1

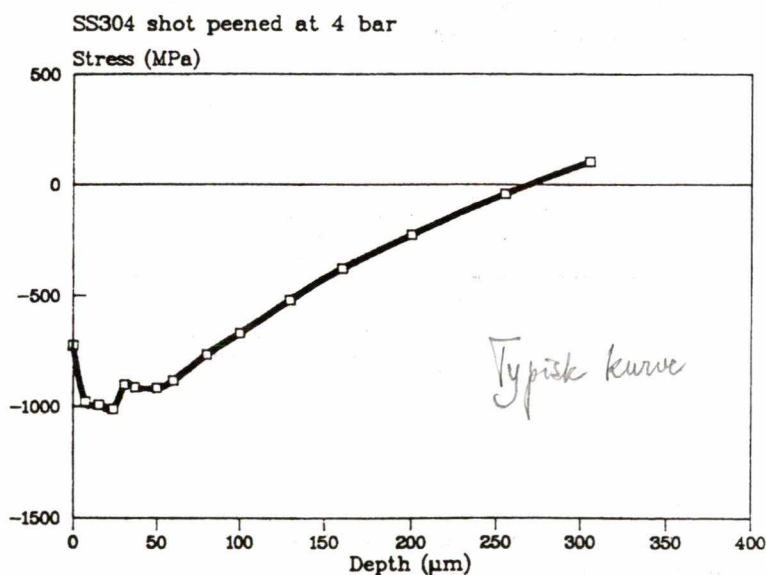
Uden for den plastiske zone er materialet elastisk deformeret i kompression. Efter rekylering af kuglen vil de elastiske spændinger i det omkringliggende materiale resultere i blivende trykspændinger i den plastiske zone. Efterhånden som hele emnets overflade rammes af kugler, vil der opbygges et tyndt overfladelag (normalt <math>< 0,5 \text{ mm}</math>), hvor materialet er under trykspændinger. Under dette lag følger et lag med trækspænding for at kompensere for over-

fladens trykspændinger. (Der skal være kraft- og momentligevægt, når der integreres over et vilkårligt tværsnit).

Et eksempel på spændingsfordelingen som funktion af afstanden fra overfladen er vist på figur 2.

Mange forskere har i de senere år beskæftiget sig med modellering og teoretisk beregning af spændingsfordelingen under shot peenede overflader. Det ligger uden for rammerne af dette indlæg at komme nærmere ind på ovennævnte beregninger, men for den interesserede kan henvises til speciallitteraturen [5], [6], [7].

Det er for nuværende nok at erindre sig det principielle forløb af spændingsfordelingen, som vist på figur 2.



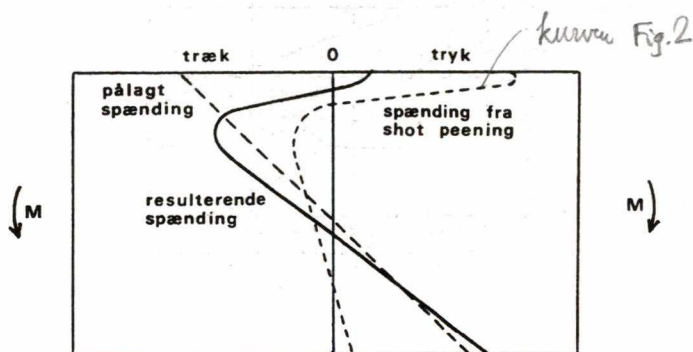
Figur 2

Spændingen efter shot peening som funktion af afstanden til overfladen.

5 mm plade af AISI 304. *rustfrit*

Den gavnlige effekt af shot peening i relation til udmattelse og spændingskorrosion er i det væsentligste resultatet af de introducerede trykspændinger.

Alle spændingskorrosionsrevner og de fleste udmattelsesrevner starter normalt fra emnernes overflade. I et shot peenet emne skal de introducerede trykspændinger og spændingerne fra ydre påvirkninger superpositioneres, som illustreret på figur 3. Nettoresultatet er, at revnedannelse forsinkes eller eventuelt helt forhindres.



Figur 3

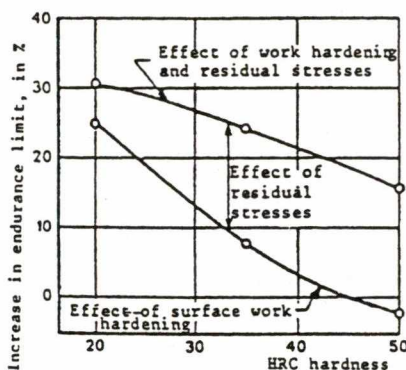
Den resulterende spænding (fuldt optrukken kurve) fremkommer ved addition af driftsspændingen fra det bøjende moment M og spændingen fra shot peening.

Under shot peening sker der også en deformationshærdning i emnets overflade. Deformationshærdningen er også medvirkende til at øge udmattelsesstyrken og dermed levetiden.

Et materiales evne til at deformationshærde afhænger bl.a. af materialets hårdhed. Tilsvarende er de maksimale stående spændinger, der kan introduceres i et materiale, også en funktion af flydespændingen og dermed af hårdheden.

Den relative betydning af deformationshærdningen og trykspændingerne for udmattelses-

egenskaberne bliver følgelig en funktion af materialets hårdhed. Figur 4 [8] viser principielt denne sammenhæng. Som det ses af figuren, er det for hårde emner de stående trykspændinger, der har den største betydning for de forbedrede udmattelsesegenskaber.



Figur 4

Den relative effekt af deformationshårdningen og de introducerede spændinger som funktion af materialets hårdhed.

SHOT PEENING-PARAMETRE

Resultatet af en shot peening-proces afhænger af mange parametre. Disse parametre kan naturligt deles i to grupper. Den ene gruppe omfatter parametre, der relaterer sig til selve processen, og den anden gruppe inkluderer parametre, der er knyttet til det materiale, der shot peenes. De vigtigste parametre er følgende:

Procesrelaterede

Intensitet

Dækningsgrad

Mætning

Eksponeringstid

Indfaldsvinkel

Hastighed

Massflow

Blæsemidlets densitet

størrelse

størrelsesfordeling

form

hårdhed

Materialerelaterede

Hårdhed

Flydespænding

Restspænding

DeformationshærdningsekspONENT

Fasestabilitet

Overfladetopografi

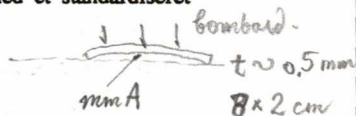
Defekter i overfladen

Geometri

Det vil i dette indlæg føre for vidt at omtale betydningen af alle disse parametre. Kun en kortfattet introduktion til de vigtigste parametre skal gives her.

Intensitet (Almen-intensitet)

Intensiteten er et mål for, hvor "meget" eller hvor "hårdt" et emne er blevet shot peenet. Almen-intensiteten måles med standardiserede stålstrips fremstillet af fjederstål. Stålstripsene fastspændes i en ligeledes standardiseret stripholder og shot peenes under identiske forhold, som det emne, der skal shot peenes. Efter shot peeningen vil teststripsen være krum som følge af de introducerede trykspændinger. Buehøjden måles i mm med et standardiseret måleuret og angiver intensiteten (mmA).



Dækning

Fuld dækning er defineret som en fuldstændig indbuling (denting, dimpling) af den oprindelige overflade, når denne betragtes gennem en lup, der forstørrer mindst 10 gange. Der

findes heldigvis også andre metoder.

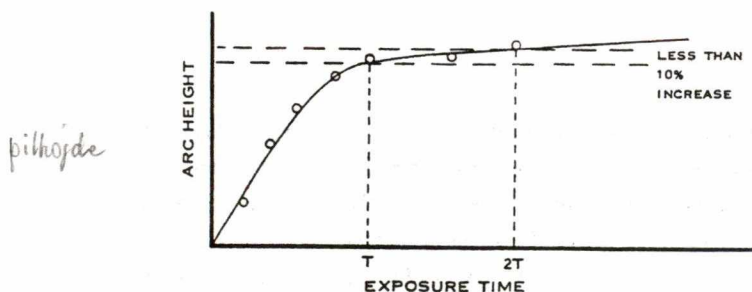
Når shot peening benyttes til at forbedre udmattelsesegenskaber eller modvirke spændingskorrosion, er det væsentligt, at fuld dækning er opnået i alle kritiske områder.

Mætning

Hvis en serie af identiske teststrips shot peenes under de samme betingelser, men i forskellige tider, kan en mætningskurve, som vist i figur 5, optegnes.

Mætning er opnået til tiden T , hvis en fordobling af eksponeringstiden medfører en stigning i buehøjden på mindre end 10%.

I litteraturen ses det ofte, at fuld dækning defineres som den tid, der giver mætning på en teststrip.

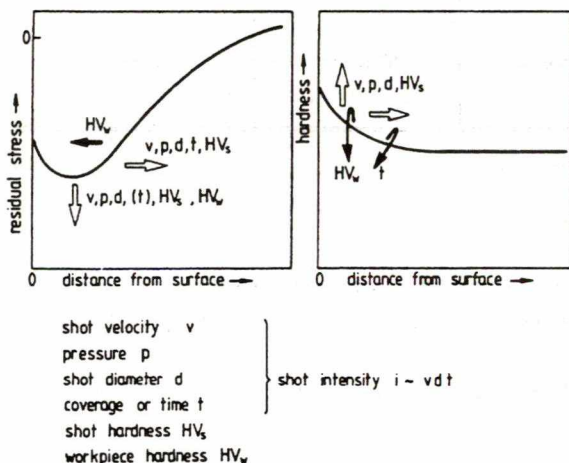


Figur 5. Mætningskurve

Det bør nævnes, at med den definition af fuld dækning, der blev givet i forrige afsnit, vil fuld dækning normalt indtræde længe inden mætning nås, specielt hvis der benyttes et inhomogent blæsemiddel.

Alle de andre parametre nævnt tidligere influerer både på intensiteten, tiden for opnåelse af mætning og spændingsfordelingen i det shot peenede emne. Figur 6 [9] viser principielt, hvorledes forskellige parametre influerer på de opnåede værdier.

For mere detaljeret information henvises til litteraturen, f.eks. Metals Handbook [10].



Figur 6
 Forskellige parametres indvirkning på spændingsfordeling og hårdhed.

EKSPERIMENTELT

Materialer

Til udmattelsesforsøgene og spændingskorrosionsforsøgene blev der benyttes $\varnothing 10$ mm stænger af rustfrit stål (AISI 304). Til udmattelsesforsøgene blev prøveemnerne tildannet af stængerne som leveret, hvorimod stængerne til prøveemnerne til spændingskorrosionsforsøgene blev udglødet ved 1050°C i 2 timer efterfulgt af en bratkøling i vand.

Følgende mekaniske egenskaber blev målt:

	Udmattelsesforsøg	Spændingskorrosionsforsøg
Flydespænding, $R_{0,2}$	489 MPa	162 MPa
Trækstyrke	801 MPa	576 MPa
Forlængelse, A_5	40%	72%

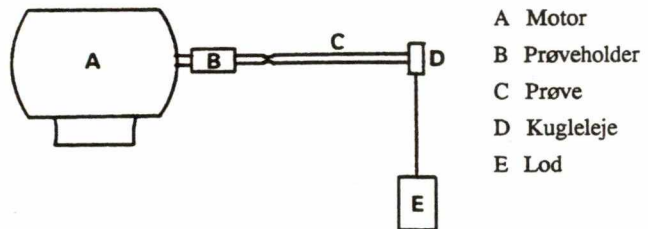
Udmattelsesforsøg

Det blev besluttet at udføre udmattelsesforsøgene med roterende bøjning, da tidligere forsøg med St. 52.3 i pulserende træk ikke havde vist nogen gavnlig effekt af shot peening.

En lignende udeblivende effekt af shot peening er rapporteret [11] med prøver af 7075-T6 udmattet i træk-tryk.

En egentlig reduktion af levetiden som følge af shot peening blev observeret med prøver af Ti-6Al-4V udsat for pulserende træk [12].

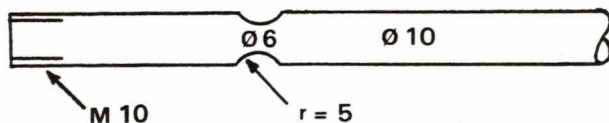
En opstilling som vist på figur 7 blev derfor valgt til udmattelsesforsøgene.



Figur 7. Opstillingen til udmattelsesforsøgene.

Prøveemnernes geometri er vist i figur 8.

Motorens omdrejningshastighed var 995 r.p.m.

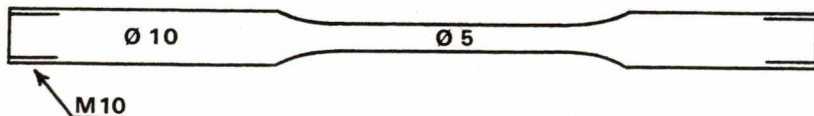


Figur 8. Udformningen af udmattelsesprøverne.

Spændingskorrosionsforsøg

Det blev besluttet at udføre spændingskorrosionsforsøgene med konstant belastning i en kogende $MgCl_2$ -opløsning, som beskrevet i ASTM G 37-73. En 36% opløsning (kogepunkt = $125^\circ C$) blev valgt, idet højere $MgCl_2$ -koncentrationer øger risikoen for sprængning af kolber, varmelegemer og svalerør, hvis opløsningen utilsigtet afkøles. Koncentrationen af opløsningen (36 wt. %) blev målt og om nødvendigt justeret ved kogepunktsbestemmelse.

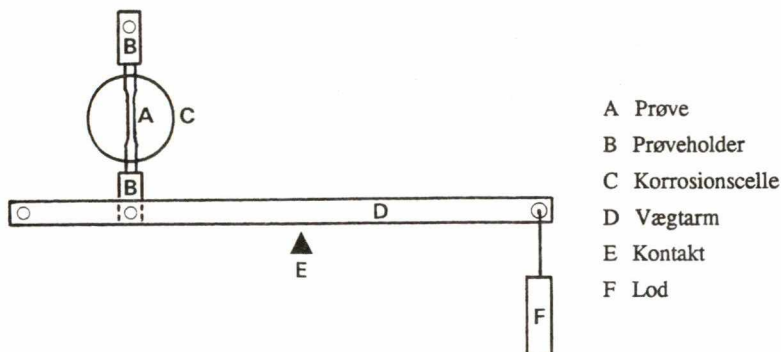
Prøveemner med en geometri som vist i figur 9 blev tildannet af de varmebehandlede stænger. For at undgå eventuelle galvaniske effekter blev glødeskallen på det ikke neddrejede stykke fjernet. Inden opspændingen af prøverne blev disses overflader affedt med acetone.



Figur 9
Prøveemnerne til spændingskorrosionsforsøgene.

Princippet i selve opstillingen er vist på skitsen i figur 10.

Via en vægtarm overføres belastningen til prøven. Når prøven bryder, aktiveres en kontakt, der afbryder et ur, således at tiden til brud registreres.



Figur 10. Opstillingen til spændingskorrosionsforsøgene.

For at sikre en konstant $MgCl_2$ -koncentration, specielt under forsøg af længere varighed, er det nødvendigt at påmontere et svalerør for at undgå inddampning.

Under forsøgene blev opløsningen gennemboblet med atmosfærisk luft.

Til spændingskorrosionsforsøgene blev de forskellige belastninger valgt som multipla af 28,8 MPa svarende til 5% af materialets trækstyrke.

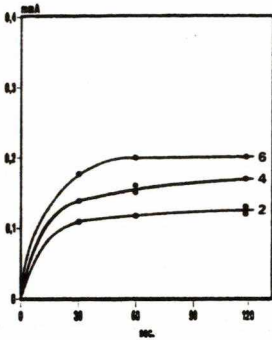
Shot peening

Prøveemnerne til både udmattelsesforsøgene og spændingskorrosionsforsøgene blev shot peenet i en kabine drevet af trykluft. Under shot peeningen roterede prøverne med 5 r.p.m. samtidig med, at dysen automatisk blev bevæget op og ned parallelt med prøvernes længdeakse. Afstanden fra dyse til prøveemne var ca. 200 mm, og dysens åbning var 6 mm.

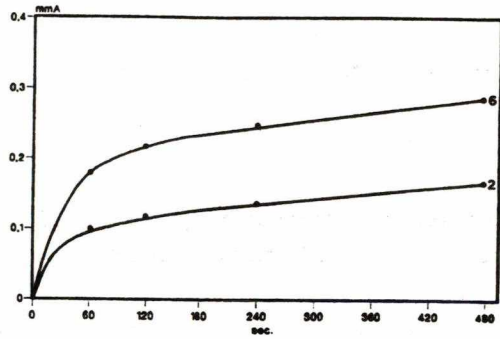
Som blæsemiddel blev der benyttet kugler af rustfrit stål (Cr/Ni nr. 20 (100-300 μm) eller Cr/Ni nr. 40 (250-650 μm)), glas (300-400 μm) eller zirkoniumoxid (Z 300).

Mætningskurverne for disse blæsemidler ved de forskelligt benyttede drivtryk er vist i figur 11-14.

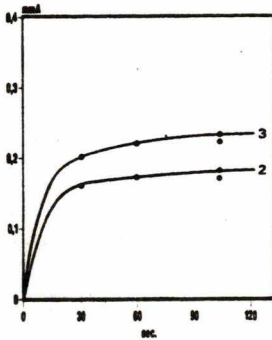
mm A s. 135



Figur 11
Mætningskurver for Cr/Ni nr. 20 ved 2, 4 og 6 bar.

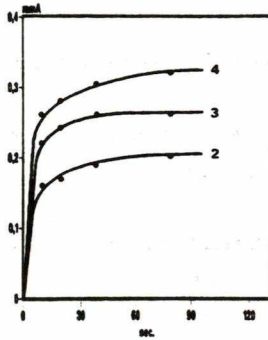


Figur 12
Mætningskurver for Cr/Ni nr. 40 ved 2 og 6 bar.



Figur 13
Mætningskurver for glas 300-400 μm ved 2 og 3 bar

Ved 4 bar knuses glas-kuglerne



Figur 14
Mætningskurver for Z 300 ved 2, 3 og 4 bar.

HPN 13

Ved shot peening med Cr/Ni nr. 20, glas eller Z 300, var eksponeringstiden i alle tilfælde 2 minutter, hvilket er ca. 4 gange den tid, der er nødvendig for at opnå mætning.

Alle prøveemner, der blev shot peenet med Cr/Ni nr. 40, blev eksponeret i 4 minutter, fordi det tog væsentlig længere tid at opnå mætning med dette medie. Årsagen kan forklares med en inhomogen størrelsesfordeling af dette blæsemiddel.

RESULTATER

Udmattelse

Resultaterne af udmattelsesforsøgene er opført i tabel 1 sammen med de væsentligste shot peening-parametre. De opnåede intensiteter kan aflæses af kurverne i figur 11-14.

σ_{max} angiver den maksimale spænding i bunden af det neddrejede stykke. Der er ikke korrigeret for nogen kærvanvisning (formfaktor) fra neddrejningen.

Som det fremgår af tabellen, blev mange prøver standset, inden der var dannet revner eller brud i prøveemnerne. Dette af hensyn til prøvningstiden. Med 995 r.p.m. tager det 1 uge at nå 10 millioner påvirkninger.

Resultaterne af udmattelsesforsøgene er vist grafisk i figur 15 og figur 16.

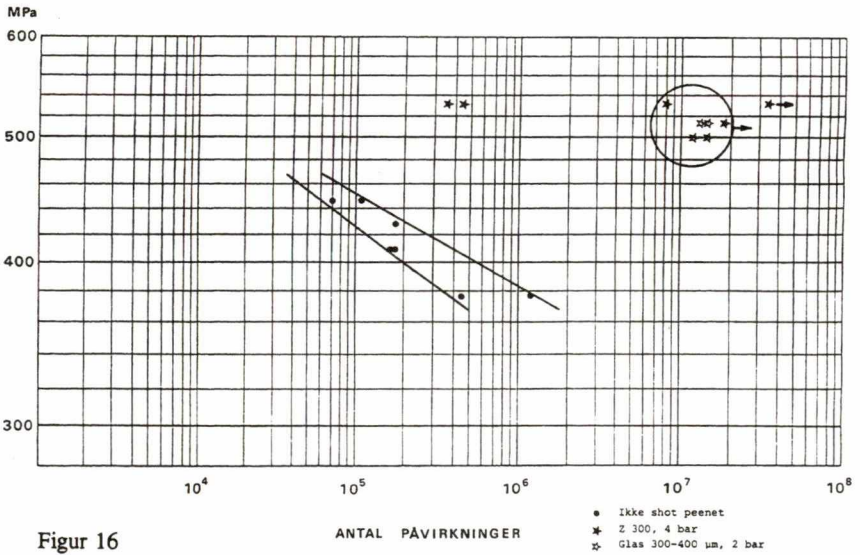
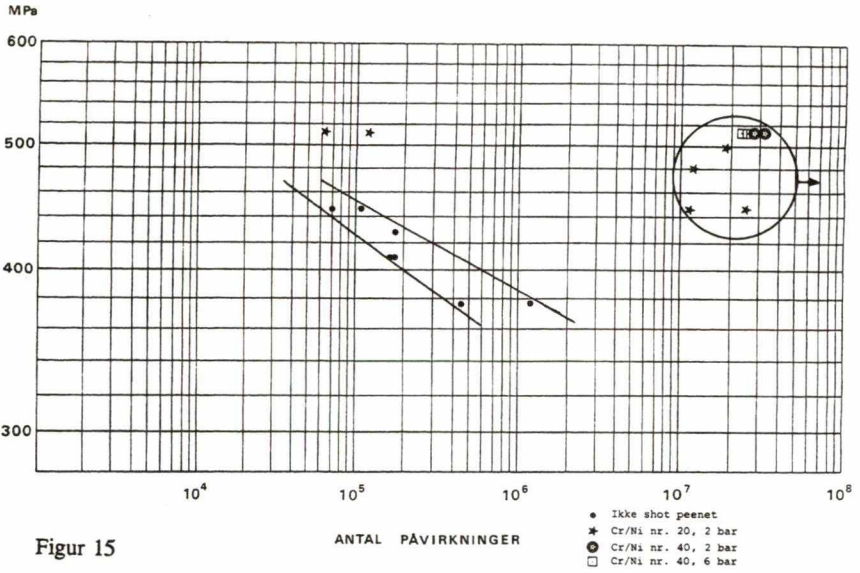
Punkterne, der ligger inden for de to optrukne rette linier, er resultaterne af udmattelsesforsøgene med ikke shot peenede prøver.

Punkter, der er forsynet med en pil, betyder, at forsøget blev standset, inden der var indtrådt brud eller revner i prøveemnet.

Som det fremgår af figur 15-16 og tabel 1, har shot peening en særdeles gavnlige effekt på udmattelsesegenskaberne.

Tabel 1

Prøve nr.	Shot peening	σ_{max} . MPa	Antal påvirkninger $\times 10^{-6}$
RR 7	Cr/Ni nr. 20, 2 bar	446	24,20 ikke brud
RR 9	Cr/Ni nr. 20, 2 bar	446	11,06 ikke brud
RR 10	Cr/Ni nr. 20, 2 bar	480	12,58 ikke brud
RR 12	Cr/Ni nr. 20, 2 bar	498	17,03 ikke brud
RR 11	Cr/Ni nr. 20, 2 bar	513	0,11 brud
RR 13	Cr/Ni nr. 20, 2 bar	513	0,06 brud
RR 20	Glas 300-400 μm , 2 bar	498	11,53 ikke brud
RR 23	Glas 300-400 μm , 2 bar	498	14,28 ikke brud
RR 24	Glas 300-400 μm , 2 bar	513	13,28 ikke brud
RR 25	Glas 300-400 μm , 2 bar	513	13,28 ikke brud
RR 28	ikke shot peenet	376	0,44 brud
RR 29	ikke shot peenet	376	1,27 brud
RR 26	ikke shot peenet	409	0,17 brud
RR 27	ikke shot peenet	409	0,17 brud
RR 36	ikke shot peenet	428	0,173
RR 30	ikke shot peenet	446	0,07 brud
RR 31	ikke shot peenet	446	0,11 brud
RR 32	Cr/Ni nr. 40, 6 bar	513	25,18 ikke brud
RR 33	Cr/Ni nr. 40, 6 bar	513	23,00 ikke brud
RR 34	Cr/Ni nr. 40, 2 bar	513	27,20 ikke brud
RR 35	Cr/Ni nr. 40, 2 bar	513	31,90 ikke brud
RR 37	Z 300, 4 bar	513	9,42 brud i gevind
RR 38	Z 300, 4 bar	513	18,38 ikke brud
RR 39	Z 300, 4 bar	531	0,44 brud
RR 40	Z 300, 4 bar	531	36,05 ikke brud
RR 41	Z 300, 4 bar	531	0,34 brud
RR 42	Z 300, 4 bar	531	8,02 ikke brud



HPN 16

Det viste sig, at det var nødvendigt at gå op til nominelle spændinger over materialets flydespænding (0,2% elasticitetsgrænse) for at få brud i de shot peenede emner.

Af alle de shot peenede prøver var det kun i de prøver, der var peenet til den laveste intensitet (0,14 mmA, Cr/Ni nr. 20, 2 bar), at der opstod brud ved en spændingsamplitude på 513 MPa.

I forsøgsserien med emner, der var blevet shot peenet med zirshot (z 300, 4 bar, 0,27 mmA), blev det forsøgt at sætte spændingen op til 531 MPa. Ved denne spænding bøjer prøveemnet synligt, og som det ses, er der stor spredning på resultaterne. En så stor spredning som her registreret (mere end 2 dekader) tyder på, at de 531 MPa ligger i overkanten, men meget tæt på en eventuel udmattelsesgrænse.

Da de fleste udmattelsesforsøg med shot peenede emner er udført med spændingsamplituder over materialets flydespænding, og da forsøgene ikke er kørt til brud, er det vanskeligt at definere og dermed bestemme levetidsforøgelsen som følge af shot peening.

Hvis imidlertid resultaterne af de ikke shot peenede emner ekstrapoleres til 500 MPa, kan det konkluderes, at levetiden af alle de shot peenede emner er blevet forøget mere end 500 gange.

Ved lavere spændinger kan endnu større levetidsforbedringer forventes.

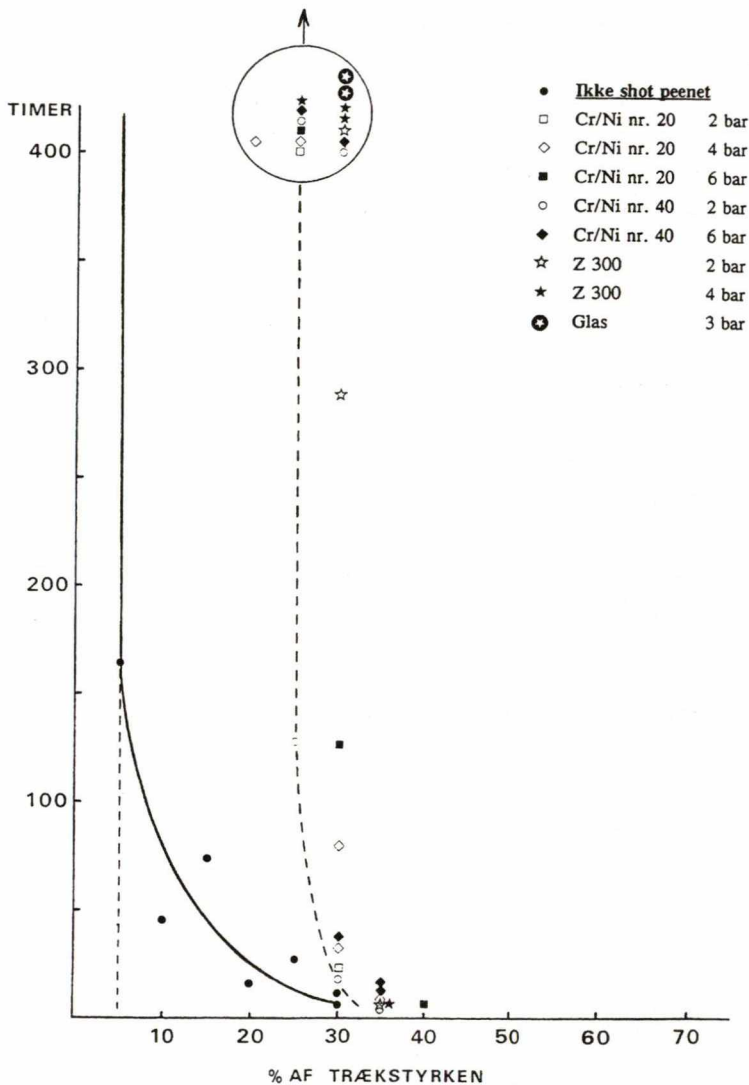
Spændingskorrosion

Resultaterne af spændingskorrosionsforsøgene er anført i tabel 2 sammen med de væsentligste shot peening-parametre. Figur 17 viser resultaterne grafisk. Den fuldt optrukne kurve til venstre i diagrammet angiver resultatet af forsøgene med ikke shot peenede prøver.

Tærskelværdien mod spændingskorrosion for de ikke shot peenede prøver er anført til 28,8 MPa (5% af R_{mL}), selv om der ved denne belastning indtrådte brud efter 163 timer.

Tabel 2

Prøve	Shot peening parametre intensitet, shot type, tryk	Belastning % af R_{mt}	Prøvningstid timer
22	Ikke shot peenet	5	163 brud
20	Ikke shot peenet	10	42 brud
24	Ikke shot peenet	15	71 brud
21	Ikke shot peenet	20	12 brud
23	Ikke shot peenet	25	26 brud
18	Ikke shot peenet	30	4 brud
25	Ikke shot peenet	30	10 brud
27	0,14 mm A, Cr/Ni nr. 20, 2 bar	25	407 ikke brud
26	0,14 mm A, Cr/Ni nr. 20, 2 bar	30	24 brud
30	0,20 mm A, Cr/Ni nr. 20, 6 bar	25	723 ikke brud
29	0,20 mm A, Cr/Ni nr. 20, 6 bar	30	124 brud
31	0,20 mm A, Cr/Ni nr. 20, 6 bar	40	3 brud
32	0,23 mm A, glas 300-400 μm , 3 bar	30	719 ikke brud
35	0,23 mm A, glas 300-400 μm , 3 bar	30	548 ikke brud
33	0,23 mm A, glas 300-400 μm , 3 bar	35	3 brud
39	0,24 mm A, Cr/Ni nr. 40, 6 bar	25	667 ikke brud
40	0,24 mm A, Cr/Ni nr. 40, 6 bar	25	569 ikke brud
36	0,24 mm A, Cr/Ni nr. 40, 6 bar	30	35 brud
41	0,24 mm A, Cr/Ni nr. 40, 6 bar	30	526 ikke brud
37	0,24 mm A, Cr/Ni nr. 40, 6 bar	35	10 brud
38	0,24 mm A, Cr/Ni nr. 40, 6 bar	35	14 brud
42	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	25	573 ikke brud
46	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	25	127 brud
48	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	25	547 ikke brud
43	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	30	524 ikke brud
45	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	30	17 brud
47	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	30	7 brud
49	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	30	15 brud
44	0,18 mm A, Cr/Ni nr. 40, 2 bar	35	2 brud
52	0,27 mm A, Z 300, 4 bar	25	672 ikke brud
53	0,27 mm A, Z 300, 4 bar	30	675 ikke brud
55	0,27 mm A, Z 300, 4 bar	30	502 ikke brud
54	0,27 mm A, Z 300, 4 bar	35	6 brud
57	0,18 mm A, Z 300, 2 bar	30	646 ikke brud
58	0,18 mm A, Z 300, 2 bar	30	284 brud
59	0,18 mm A, Z 300, 2 bar	35	4 brud
60	0,18 mm A, Z 300, 2 bar	35	7 brud



Figur 17. Resultaterne af spændingskorrosionsforsøgene.

Af resultaterne ses det, at shot peening øger tærskelværdien mod spændingskorrosion med en faktor 5-6 afhængigt af shot peening-parametrene. Shot peening til en Almen-intensitet på 0,27 mmA (Z 300, 4 bar) medførte en tærskelværdi på 30% af trækstyrken. Samme tærskelværdi kunne opnås ved shot peening med glas til en intensitet på 0,23 mmA. Shot peening til lavere Almen-intensiteter medførte tærskelværdier på 25% af trækstyrken. Denne tærskelværdi kunne opnås, uanset hvordan shot peeningen var udført. Der blev ikke shot peenet emner til Almen-intensiteter lavere end 0,14 mmA.

KONKLUSION

Shot peening er en effektiv metode til forbedring af rustfrit ståls udmattelsesegenskaber.

Sammenlignet med identiske, men ikke shot peenede prøver, er der opnået levetidsforbedringer på mere end 500 gange.

Forsøgene antyder, at en shot peening til intensiteter større end 0,25 mmA kan hæve udmattelsesgrænsen op på et niveau over materialets flydespænding.

Shot peening viste sig også at være effektiv til at imødegå spændingskorrosion. Shot peenede prøver kunne således belastes 5-6 gange højere end ikke shot peenede prøver, uden at der opstod brud.

Valget af shot peening-parametre synes ikke at være særlig kritisk.

Alle fjederfabrikanten shot peener idag.
Andre fjerner glødeskal ved -
Landbrugsfabrikanten s. p. harvetønder
Følgerne på alle Boeing shot peenes af Hans Peter
F 16 do

REFERENCER

- [1] W.H. Friske, Shot Peening to Prevent the Corrosion of Austenitic Stainless Steels, AI-75-52, Rockwell International Corporation, 1975.
- [2] J. Sandford, Peening Prevents Intergranular Corrosion, Design News, January 12th, 1976.
- [3] R. Kopp and H.-W. Ball, Recent Development in Shot Peen Forming, Third International Conference on Shot Peening, Garmisch-Partenkirchen, FRG, 1987.
- [4] Shot Peening Application, Metal Improvement Company, Inc., 6th edition, 1980.
- [5] S.T.S. Al-Hassani, The Shot Peening of Metals - Mechanics and Structures, Society of Automotive Engineers, Inc., SP 528, October 1982.
- [6] M. Roth and J. Bernasconi, Residual Stress Distribution in Shot Peened Plates - Analysis of Experimental Data, International Conference on Residual Stresses, Garmisch-Partenkirchen, FRG, 1986.
- [7] H. Guechichi et.al., Predicting Residual Stresses due to Shot Peening, International Conference on Residual Stresses, Garmisch-Partenkirchen, FRG, 1986.
- [8] A. Niku-Lari, Shot Peening, First International Conference on Shot Peening, Paris, September, 1981.
- [9] O. Vöhringer, Changes in the State of the Material by Shot Peening, Third International Conference on Shot Peening, Garmisch-Partenkirchen, FRG, 1987.
- [10] Metals Handbook, Volume 5, p. 138-149, 1982.
- [11] G.S. Wass et al, Effect of Shot Peening Methods on the Fatigue Behaviour of Alloy 7075-T6, First International Conference on Shot Peening, Paris, 1981.
- [12] L. Wagner and G. Lütjering, Influence of a Shot Peening Treatment on the Fatigue Limit of Ti-6Al-4V, Second International Conference on Shot Peening, Chicago, Illinois, USA, May 1984.

