

GRANIČNE VREDNOSTI UNUTRAŠNJEG PRITISKA ZA CILINDRE SA PRSLINOM

LIMIT PRESSURE VALUES FOR INTERNALLY PRESSURIZED CRACKED CYLINDERS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 669.14-434.1:539.42

Rad primljen / Paper received: 1.12.2002.

Adresa autora / Author's address:

(1) HIP Azotara Pančevo, KKOM, Pančevo, Srbija i Crna Gora

(2) Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija i Crna Gora

Ključne reči

- Sila razvoja prsline
- J_R kriva
- Numeričko rešenje
- Granične vrednosti pritiska

Keywords

- Crack driving force
- J_R curve
- Numerical solution
- Limit pressure values

IZVOD

Primenom EPRI inženjerskog pristupa izračunate su vrednosti graničnih pritisaka za dugačak cilindar pod unutrašnjim pritiskom sa uzdužnom prslinom. J_R kriva i sila razvoja prsline su aproksimirane polinomima po pripaštaju prsline $a - a_0$ i dužine prsline a . Pokazan je uticaj geometrije cilindra na unutrašnji pritisak p_i koji odgovara početku rasta prsline i na unutrašnji pritisak p_f za nestabilnost sistema. Prividna žilavost materijala i relativna promena pritiska p_i za različite debljine zida se povećavaju pri stabilnom rastu prsline. Pokazano je da je relativan stabilan rast prsline veći od vrednosti koju dopušta ASTM E-399.

ABSTRACT

By applying EPRI engineering approach, limit pressure values for internally pressurized long cylinder with an axial crack are estimated. The J_R curve and crack driving force are approximated by polynomials in terms of crack growth $a - a_0$ and crack length a . It is shown the effect of cylinder geometry on internal pressure p_i corresponding to the onset of crack growth as well on internal pressure p_f for system instability. The apparent material toughness and the relative change of pressure p_i for different wall thicknesses increase with the stable crack growth. It is shown that the relative stable crack growth is greater than the value allowed by the ASTM E-399.

UVOD

Inženjerski pristup EPRI analizi elasto-plastičnog loma omogućava analizu rasta prsline i stabilnosti konstrukcije od žilavog materijala primenom J-integrala /1,2/. Sila razvoja prsline, data J-integralom, izračunata je superponiranjem potpuno plastičnih rešenja na poznata elastična rešenja, dok se u nekim drugim modelima umesto njih dodaju elasto-plastična rešenja /3/. Dopuštajući stabilan rast prsline, ovaj pristup pokazuje više tolerancije nego metode linearno-elastične mehanike loma primenjene u ASME standardu za kotlove i posude pod pritiskom /4-6/. Početak rasta prsline, njen stabilni rast i tačka konačne nestabilnosti sistema predviđaju se grafički pomoću različitih dijagrama za analizu /1,2/. Analiza je izvedena za određeni cilindar i prslinu. Analitičko-grafičko rešenje postoji u /1,8/, ali ne i numeričko rešenje. Zavisno od primena, može se sačiniti više dijagrama za analizu. Dijagram sile razvoja prsline (CDF) je zapravo grafičko rešenje za stabilni rast prsline. Dijagram graničnih vrednosti pritiska daje skup rešenja od kojih je svako dobijeno sa jednog CDF dijagrama za datu geometriju cilindra i početnu dužinu prsline a_0 . Dijagram procene stabilnosti daje zavisnost J-integrala od modula čupanja T_J i određuje oblasti opterećenja u kojima je ponašanje stabilno i nestabilno. Dijagram procene loma (FAD) je podesan za preliminarnu ocenu granice sigurnosti konstrukcije sa prslinom. On se zasniva na pristupu "dva kriterijuma", koji je

INTRODUCTION

The EPRI engineering approach for elastic-plastic fracture analysis enables crack growth and stability analysis for ductile materials by the use of the J-integral /1,2/. The crack driving force in terms of J integral is computed by superposing fully plastic solutions on known elastic solutions, whereas in some other models elastic-plastic solutions are superposed instead /3/. Allowing stable crack growth, the approach is more tolerable than the linear-elastic fracture mechanics methods applied in ASME Boiler and Pressure Vessel Code /4-6/. The initiation of crack growth, stable crack growth and the point of system instability are predicted graphically, by using different analysis diagrams /1,2/. The analysis is performed for a given cylinder with a given crack. Analytical-graphical solution is given in /1,8/, but numerical solution did not. Depending on the use, several analysis diagrams can be generated. The crack driving force (CDF) diagram is in fact graphical solution for stable crack growth. The limit pressure values diagram gives the set of solutions, each obtained from one CDF diagram for given cylinder geometry and initial crack length a_0 . The stability assessment diagram is the plot J-integral vs. tearing modulus T_J and defines loading regions in which the behaviour is stable and unstable. The failure assessment diagram (FAD) is convenient in safety margin preliminary assessment of flawed structure. It is based on the "two criteria" approach

razvijen u CEGB, a čiji najpoznatiji oblik je poznat pod nazivom R-6 dijagram. Kriva procene loma određena pristupom rasta prsline kontrolisanog J-integralom uračunava geometriju tela sa prslinom, vrstu opterećenja i osobine tečenja materijala.

Ovi dijagrami dati su u literaturi /1,2,10,12/. U ovom radu je grafička analiza, podržana numeričkom metodom, primenjena, sa povećanom tačnošću, na različite cilindre sa unutrašnjom podužnom prslinom.

INŽENJERSKI PRISTUP EPRI

Elasto-plastična analiza mehanike loma u neelastičnoj oblasti rešava nelinearan problem, pri čemu je potrebno uzeti u obzir zatupljivanje prsline pre početka njenog rasta, kao i njen stabilni rast. Ovaj problem se razlikuje od krtog loma kod koga se početak rasta prsline i njeno brzo širenje odigravaju skoro istovremeno. Za dovoljno malu plastičnu zonu u odnosu na dužinu prsline, J-integral, koji karakteriše napone i deformacije u plastičnoj zoni u blizini vrha prsline i faktor intenziteta napona K , koji karakteriše napone i deformacije u elastičnoj zoni, povezuje jednakost

$$J = K^2 / E' \quad 1.$$

$E' = E$ za ravno stanje napona, $E' = E/(1 - \nu^2)$ za ravnu deformaciju, E je modul elastičnosti i ν je Poasonov broj.

Potpuno plastična rešenja i njihova analiza su primenljivi na konstrukcije sa prslinama koje su u stanju punog tečenja, dok se većina problema od praktičnog interesa odnosi na elasto-plastično područje i procedura ocene kombinuje linearno-elastična J_e i potpuno plastična rešenja J_{pl} :

$$J = J_e + J_{pl}, \quad 2.$$

Otpornost materijala prema sporom stabilnom rastu prsline, određena eksperimentalno kao funkcija rasta prsline (J_R kriva, /1/), ne zavisi od konfiguracije prsline i takođe ne zavisi od toga da li je određena na uzorcima koji su u stanju potpunog tečenja ili sa ograničenim tečenjem, i zbog toga je svojstvo materijala. Opšti parametar žilavosti loma J_{Ic} , povezan sa K_{Ic} (jedn. 1) predstavlja tačku J_R krive koja odgovara početku rasta prsline. Početak njenog rasta nastupa kada se izjednače delujuć J integral, odnosno sila razvoja prsline, i žilavost loma materijala /1/:

$$J(a_0, P) = J_{Ic} \quad 3.$$

gde je P opterećenje po jedinici debljine. Primena J integrala na određivanje rasta prsline je moguća pod izvesnim uslovima. Prvi je da je ukupan iznos stabilnog rasta prsline Δa mnogo manji od radijusa R_J zone oko vrha prsline produžene za dužinu njenog rasta u kojoj je plastična deformacija skoro proporcionalna. Rast dužine prsline u toku ovog procesa je Δa , sl. 1. Radijus neproporcionalne oblasti mora da bude mnogo manji od R_J . Uslov za neprekidan rast prsline, tj. za ravnotežni rast prsline, je:

$$J(a, P) = J_R(a - a_0) \quad 4.$$

gde je $a = a_0 + \Delta a$ dužina rastuće prsline, $\Delta a = a - a_0$ iznos stabilnog rasta prsline u odnosu na a_0 .

which developed in CEGB, which most best known form is entitled R-6 diagram. The failure assessment curve derived from the J-controlled crack growth approach accounts for cracked body geometry, the loading type and material flow properties.

These diagrams are given in references /1,2,10,12/. In this paper, the graphical analysis, supported by numerical methods, is applied, with increased accuracy, to different cylinders with internal axial crack.

THE ENGINEERING APPROACH EPRI

The elastic-plastic fracture analysis in non-linear region solves the non-linear problem, and it is necessary to consider the crack tip blunting before the initiation of crack growth, as well its stable growth. This problem differs from the brittle fracture where the onset of crack propagation and its rapid growth occur almost simultaneously. If small-scale yielding conditions prevail, J integral, which characterizes the near-crack tip stresses and strains in the plastic zone, and the stress intensity factor K , which characterizes stresses and strains in the elastic zone, are related by

$$J = K^2 / E' \quad 1.$$

$E' = E$ for plane stress, $E' = E/(1 - \nu^2)$ for plane strain, E is elastic modulus and ν is Poisson's ratio.

Fully plastic crack solutions and analysis are applicable to cracked configurations with full scale yielding, but most crack problems of practical interest are in the elastic-plastic regime and the assessment procedure combines the linear-elastic J_e and fully plastic J_{pl} solutions:

$$J = J_e + J_{pl}, \quad 2.$$

Material resistance to slow stable crack growth, determined experimentally as a function of crack growth (J_R curve, /1/), is independent of crack configuration and also is the same when it is obtained from full-scale yielding samples or with constrained yielding, and accordingly it is material property. The common fracture toughness parameter, J_{Ic} , related to K_{Ic} (Eq. 1), represents a single point of J_R curve, corresponding to the initiation of crack growth. The crack initiation will occur when the applied J integral, i.e. crack driving force, equals the material fracture toughness /1/:

$$J(a_0, P) = J_{Ic} \quad 3.$$

where P is load per unit thickness. The application of J integral for determination of crack growth is possible under some conditions. First one is that the total amount of stable crack growth Δa is much less than the radius R_J of the zone ahead the extended crack tip, where plastic deformation is almost proportional. The crack extension during the growth process is Δa , Fig.1. Nonproportional region radius must be much less than R_J . The condition for continual crack extension, i.e. for equilibrium of crack growth, is:

$$J(a, P) = J_R(a - a_0) \quad 4.$$

where $a = a_0 + \Delta a$ is the length of growing crack and the amount $\Delta a = a - a_0$ is stable crack growth in respect to a_0 .

Jednačina 4. je uopštenje jedn. 3. i J_{Ic} odgovara tački J_R krive na početku rasta prsline. Rast prsline postaje nestabilan, kada je brzina rasta sile razvoja prsline veća od brzine promene J_R krive:

$$(\partial J / \partial a)_{\Delta T} \geq dJ_R / da \quad 5.$$

gde se parcijalni izvod izračunava pri konstantnom ukupnom pomeranju ΔT . Ovo ograničenje se zamenjuje uslovom konstantnog unutrašnjeg pritiska, tj. sistem ima kontrolisano opterećenje, što daje konzervativnu ocenu. Dijagram sile razvoja prsline daje grafičko rešenje jednačina za stabilan rast prsline 4. i 5.

IZRAZI ZA ELASTO-PLASTIČNU OCENU

Izraz 2. za J integral za žilav materijal čiji deformacija i napon zadovoljavaju Ramberg-Osgoodova relaciju, glasi:

$$J = f_1(a_e / H, R_i / R) \frac{p^2}{E'} + \alpha \sigma_o \varepsilon_o (H - a) h_1(a / H, n, R_i / R) (p / p_o)^{n+1} \quad 6.$$

gde je a_e efektivna dužina prsline /1,2/. Funkcija f_1 količnika a/H i R_i/R data je preko bezdimenzionalne funkcije F istih količnika. R_i i R su unutrašnji i spoljni poluprečnik cilindra, a H je debljina njegovog zida. EkspONENT deformacionog ojačavanja je označen sa n .

$$f_1(a / H, R_i / R) = 4\pi a \frac{1}{[1 - (R_i / R)^2]^2} F^2(a / H, R_i / R) \quad 7.$$

Cilindar sa prslinom dat je na sl. 1. U unutrašnjosti cilindra i na površine prsline deluje ravnomeran pritisak p . Usvaja se da je cilindar u stanju ravne deformacije.

Funkcija F je data tabelarno za tri vrednosti količnika H/R_i : 1/5; 1/10 i 1/20 i za svaku od njih za četiri vrednosti količnika dubine prsline i debljine zida (a/H): 1/8; 1/4; 1/2 i 3/4 /1,2/. Sa p_o je označen granični pritisak idealno plastičnog materijala ($n \rightarrow \infty$). Izraz za donju ocenu vrednosti p_o je:

$$p_o = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{H - a}{R_i + a} \sigma_o \quad 8.$$

ε_o and σ_o su deformacija i napon tečenja. respektivno, a α je konstanta u Ramberg-Osgudovoj konstitutivnoj relaciji:

$$\varepsilon / \varepsilon_o = \sigma / \sigma_o + \alpha (\sigma / \sigma_o)^n \quad 9.$$

RAČUNARSKI PROGRAM

Fortranski program PPF.for daje numerička rešenja nelinearne jedn. 3, p_i , odnosno nelinearnih jedn. 4. i 5. Par rešenja su pritisak pri nestabilnosti p_f i dubina prsline a_f dostignuta sporim (stabilnim) rastom.

$$a_f = a_o + \Delta_f a \quad 10.$$

Ulazni podaci: geometrijske karakteristike cilindra (R_i, H , sl. 2), osobine materijala ($E, n, \nu, \alpha, \varepsilon_o, \sigma_o = R_{p0.2}$), početna dubina prsline a_o , podaci za aproksimaciju J_R krive i vrednost dužine (dubine) prsline (za koju se pozivaju potprogrami) se učitavaju u glavnom programu. Potprogram PRES izračunava prvo rešenje jedn. 3. Drugi potprogrami

Equation 4. is the generalisation of Eq. 3. and J_{Ic} corresponds to J_R curve point at crack growth initiation. The crack growth becomes unstable when crack driving force growth rate is higher then J_R curve change rate:

where partial derivative is calculated with total displacement ΔT held fixed. This limitation is replaced by the condition of constant internal pressure, i.e. the system is load controlled, which gives a conservative estimation. The crack driving force diagram gives the graphical solution to crack growth stability Equations 4. i 5.

FORMULAE FOR ELASTIC-PLASTIC ESTIMATION

For ductile material which follows Ramberg-Osgood stress-strain relation, Eq. 2 has the form:

where a_e is the effective crack length /1,2/. The function f_1 of ratios a/H and R_i/R is related to a nondimensional function F of the same ratios. R_i and R are inner and outer radius of a cylinder and H is its wall thickness. Strain hardening exponent is designed by n .

The flawed cylinder is given in Fig. 1. Uniform pressure p is applied inside of the cylinder and on the crack faces. The cylinder is supposed to be in plane strain condition.

The function F is tabulated for three ratio values of H/R_i : 1/5; 1/10 and 1/20 and for each of them for four ratio values of a/H : 1/8; 1/4; 1/2 and 3/4 /1,2/. Limit load for perfectly plastic material ($n \rightarrow \infty$) is designed by p_o . A lower bound expression for p_o is:

ε_o and σ_o are yield strain and yield stress, respectively, and α is a constant in Ramberg-Osgood constitutive relation:

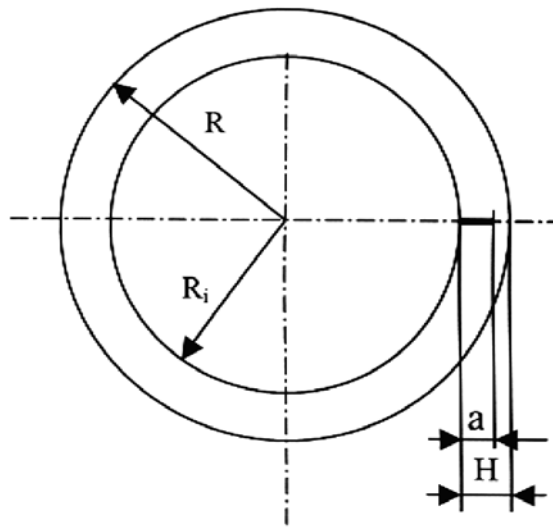
THE COMPUTER PROGRAM

The fortran program PPF.for gives numerical solutions to nonlinear equation 3, p_i and of nonlinear equations 4. and 5. The pair of solutions are pressure at instability p_f and crack length after slow (stable) crack growth a_f .

The input data: geometrical characteristics (R_i, H , Fig.2), material properties ($E, n, \nu, \alpha, \varepsilon_o, \sigma_o = R_{p0.2}$), initial crack length a_o , data for J_R curve approximation and crack length value (for which subroutines are called), are read in the main program. The subroutine PRES calculates first solution to equation. 3. The other subroutines calculate the

solution iterativno izračunavaju koren jednačine 3, p_i , odnosno par rešenja ($a_f p_f$) za jednačine 4. i 5, iterativno metodom Njutn-Rafsona. Potprogram TKNS proračunava CDF dijagram u okolini tačke konačne nestabilnosti ($X_f p_f$), gde je $X_f = a_f/H$ ($X=a/H$), tj. izračunava J-integral tačno za vrednosti pritiska p_i i p_f , kao i J_R krivu. Aproksimacija J_R krive i funkcije h_1 u potpuno plastičnom delu J integrala, jedn. 6, data je polinomima po $X-X_0$ i X , respektivno, pri čemu je ($X_0=a_0/H$). Tačke podataka za J_R krivu, uzete iz rada /8/ su aproksimirani polinomom petog stepena, (sl. 2). Usvojen je čelik A 533B sa: $\alpha=1,12$, $\sigma_0=414$ MPa, $\varepsilon_0=0,002$, $J_{Ic}=350$ kPaxm, $\nu=0,3$ $E=207 \times 10^3$ MPa i $n=10/1,2/$. Za ispitivanje rada programa su korišćeni neki rezultati rada /8/.

to the equation 3, p_i , and pair of solutions ($a_f p_f$) of equations 4 and 5. iteratively by using the Newton-Raphson's method. The subroutine TKNS calculates the CDF diagram in the vicinity of the instability point ($X_f p_f$) where $X_f = a_f/H$ ($X=a/H$), i.e. it calculates J-integral exactly for pressure values p_i and p_f as well the J_R curve. J_R curve approximation and function h_1 in fully plastic part of J integral, Eq. 6, are given by polynomials in terms $X-X_0$ and X respectively ($X_0=a_0/H$). The J_R curve data points, taken from /8/, are approximated by the fifth order polynomial (Fig. 2). The A533B steel is accepted, i.e. $\alpha=1,12$, $\sigma_0=414$ MPa, $\varepsilon_0=0,002$, $J_{Ic}=350$ kPaxm, $\nu=0,3$ $E=207 \times 10^3$ MPa i $n=10/1,2/$. For program testing some results from /8/ are used.



Slika 1. Poprečni presek cilindra sa podužnom prslinom

Figure 1. The cross section of an axially cracked cylinder

DIJAGRAM SILE RAZVOJA PRSLINE

Dijagram CDF za cilindar izrađen od čelika A533B sa $R_i/H=5$ je dat na sl. 2. levo za $a_0=25$ mm na segmentu $X \in [0,25;0,30]$. J kriva za vrednost pritiska p_i , seče J_R preseca krivu povučenu kroz kružice, koji predstavljaju aproksimirane tačke ($N=19$), u tački $X-X_0=0$ sa ordinatom $J_{Ic}=350$ kPaxm.

J kriva za pritisak $p_f=76,1615$ MPa (označena isprekidanom linijom) i J_R kriva imaju zajedničku tangentu u tački $X_f-X_0=dX_f=0,03484$, što je označeno vertikalnom tačkastom linijom. Tačka dX_f daje ukupan stabilan rast prsline po jedinici debljine zida ($dX_f=\Delta a/H$, $\Delta a=a_f-a_0=3,484$ mm).

Koeficijent korelacije dat veličinom $r=0,99999$, a veličina $SD=1,18001$ kPaxm je greška aproksimacije polinomom datim na slici 2 levo. Redni brojevi datih tačaka J_R krive su prikazani na gornjoj apscisnoj osi (ovi brojevi su tačni ako su jednaki ili veći od 12, jer za manje redne brojeve date tačke su na manjim udaljenostima).

Količnik $\Delta a/a_0=(a_f-a_0)/a_0$ daje relativni stabilni rast prsline. Najveće povećanje prividne žilavosti materijala, mereno J integralom, je $J_R(\Delta a)/J_{Ic}=220,4\%$ (sl. 2).

THE CRACK DRIVING FORCE DIAGRAM

The CDF diagram for the cylinder made of A533B steel with $R_i/H=5$ is given in Fig. 2 left for $a_0=25$ mm in the segment $X \in [0,25;0,30]$. J curve for the pressure value p_i , intersects the J_R curve, drawn through circles presenting approximated points ($N=19$), at the point $X-X_0=0$ with ordinate $J_{Ic}=350$ kPaxm.

The J-curve for the pressure $p_f=76,1615$ MPa (given by dash line) is tangent to the J_R curve at the point $X_f-X_0=dX_f=0,03484$, as denoted by a vertical dotted line. The point dX_f gives the total amount of crack growth per unit wall thickness ($dX_f=\Delta a/H$, $\Delta a=a_f-a_0=3,484$ mm).

Correlation coefficient is given as $r=0,99999$ and the value $SD=1,18001$ kPaxm is approximation error for the polynomial given in Fig. 2 left. The ordinal numbers of J_R curve given points are displayed at the upper X-axis (these numbers are valid if equal to or greater than 12, because distances between data points for smaller point numbers are less).

The ratio $\Delta a/a_0=(a_f-a_0)/a_0$ gives relative amount of stable crack growth. The increase of the apparent material toughness, measured by J integral (Fig. 2) is $J_R(\Delta a)/J_{Ic}=220,4\%$.

Porast graničnog opterećenja $(p_f - p_i) / p_i$ iznosi približno 8,7% za $H=100$ mm i $a_0=25$ mm. Za manje H i veće R_i/H , očekuje se njegovo smanjenje i zavisnost od a_0 .

The relative increase of limit pressure $(p_f - p_i) / p_i$ is about 8,7% for $H=100$ mm and $a_0=25$ mm. For lower H and greater R_i/H , its decreasing is expected and dependence on a_0 .

DIJAGRAMI GRANIČNIH VREDNOSTI PRITISKA

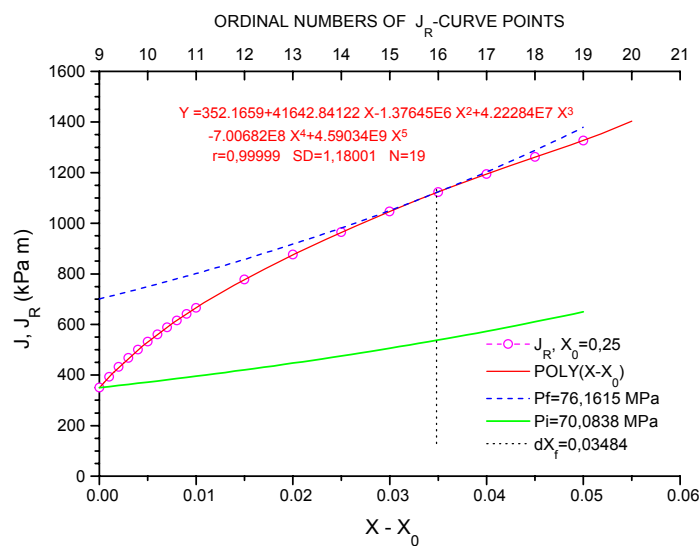
THE LIMIT PRESSURE VALUES DIAGRAMS

Dijagrami graničnih vrednosti unutrašnjeg pritiska u cilindru daju opterećenja p_i i p_f u funkciji početne dužine prsline a_0 . Kriva promene p_i daje donju granicu, a kriva p_f gornju granicu opterećenja u procesu duktilnog loma.

Limit pressure values diagrams show pressure loadings p_i and p_f as functions of the initial crack length a_0 . The curve for p_i change gives a lower bound and the curve for p_f values gives upper bound for the ductile fracture process.

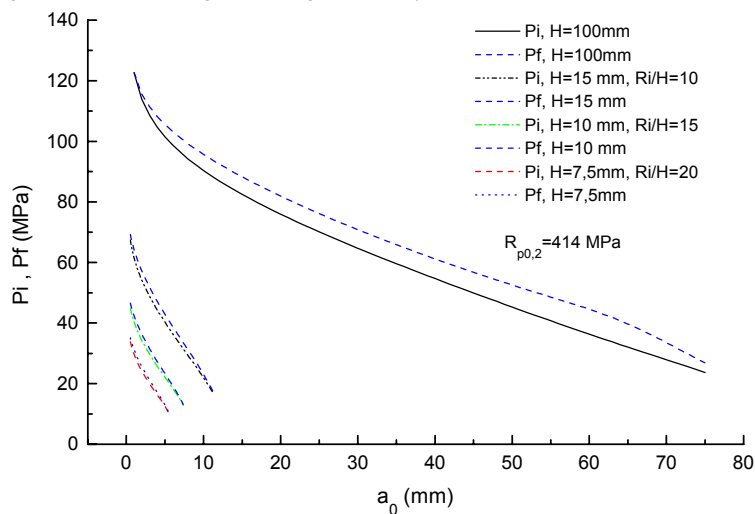
Otuda ovi dijagrami određuju kapacitet opterećenja cilindra kome odgovara stabilan rast prsline. Slika 3 daje zavisnosti p_i i p_f od a_0 za usvojene geometrije ($H=15$ mm, 10 mm i 7,5 mm i $R_i=150$ mm). Dijagram je izračunat za $R_i=150$ mm, $R_{p0.2}=560$ MPa i J_R krivom kao za čelik A533 B. Zavisnosti p_i i p_f od a_0 su opadajuće. Najveći srednji gradijent i najmanje rastojanje krivih p_i i p_f odgovaraju najmanjoj debljini zida.

Thus these diagrams determine cylinder loading capacity for stable crack growth. Figure 3 illustrates dependences of p_i and p_f on a_0 for assumed geometries ($H=15$ mm, 10 mm and 7,5 mm and $R_i=150$ mm). The diagram is calculated with $R_i=150$ mm, $R_{p0.2}=560$ MPa and J_R curve as for A533 B steel. The dependences of p_i i p_f and P_f on a_0 are decreasing. Highest mean gradient and the smallest distance of p_i and p_f curves correspond to the smallest wall thickness.



Slika 2. Dijagrami sile razvoja prsline za cilindar sa $R_i/H=5$ i $H=100$ mm

Figure 2. Crack driving force diagrams for cylinder with $R_i/H=5$ and $H=100$ mm



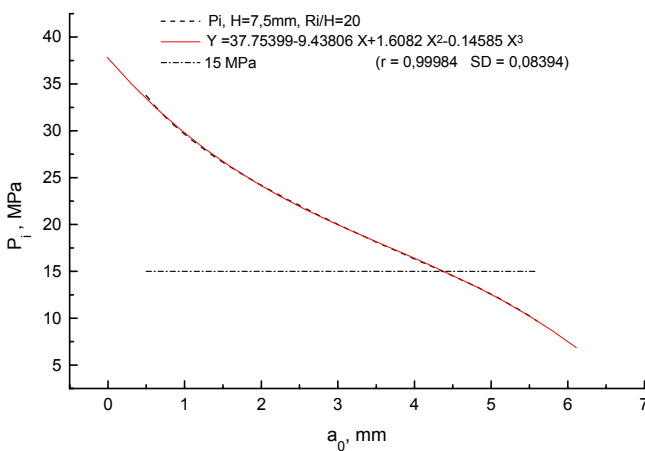
Slika 3. Dijagram graničnih vrednosti pritiska za različite cilindre ($R_i=150$ mm)

Figure 3. Boundary pressure values diagram for different cylinders ($R_i=150$ mm)

Zavisnost p_i od dužine prsline a_0 analitički je data polinomom trećeg stepena u velikom opsegu dužine i sa dovoljnom tačnošću, što se vidi iz dijagrama na sl. 4. Izbor ispitanih geometrija odgovara dimenzijama posuda za prevoz gasa pod pritiskom 15 MPa sa $R_i=150$ mm i dužinom većom od spoljnog prečnika.

Ocenjujući da debljina zida H od 7,5 mm /7,9/ korišćenih posuda ne zadovoljava sa stanovišta bezbednosti, izrađene su nove posude od čelika Č8380 komercijalne oznake N80 ($R_{p0.2}=560$ MPa), debljine zida cilindričnog dela 10 mm. U izvedenoj analizi je usvojeno da su i one izrađene od čelika A533B. Proračun je izveden za tri vrednosti H : 7,5 mm ($R_i/H=20$), 10 mm ($R_i/H=15$) i 15 mm ($R_i/H=10$) pod pretpostavkom da je lom žilav.

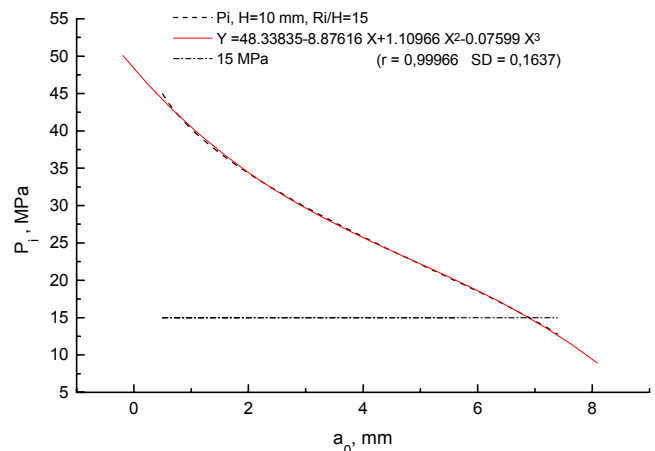
Prema sl. 4, unutrašnji pritisak $p_i \approx 15$ MPa inicira prslinu sa $a_0 = 4,4$ mm za $H = 7,5$ mm i prslinu sa $a_0 = 6,9$ mm za $H = 10$ mm.



The dependence of p_i on crack length a_0 is analytically given in a large length range by the third order polynomial with sufficient accuracy, as shown in diagrams in Fig. 4. The choice of checked geometries corresponds to sizes of vessels for gas transport under pressure 15 MPa with $R_i=150$ mm and the length greater than the outside diameter.

Evaluating wall thickness H of 7.5 mm /7,9/ in used pressure vessel as non sufficient from safety point of view, new vessels had been produced of Č8380 steel, trade mark N80 ($R_{p0.2}=560$ MPa) with cylindrical part wall thickness 10 mm. In performed analysis is assumed that they are also produced of A533B steel. The calculation is performed for three H values: 7,5 mm ($R_i/H=20$), 10 mm ($R_i/H=15$) and 15 mm ($R_i/H=10$) assuming ductile fracture.

According to Fig. 4, internal pressure $p_i \approx 15$ MPa initiates the crack with $a_0 = 4,4$ mm for $H = 7,5$ mm and the crack with $a_0 = 6,9$ mm for $H = 10$ mm.



Slika 4. Aproksimacija zavisnosti p_i od dužine prsline a_0 za $R_{p0.2} = 414$ MPa

Figure 4. Approximated dependences of p_i on crack length a_0 for $R_{p0.2}= 414$ MPa

Neka $p_i(414) = p_i(R_{p0.2}=414$ MPa) označava vrednost pritiska p_i za $R_{p0.2}=414$ MPa pri datoj dužini X_0 .

Relativna promena p_i za navedenu promenu $R_{p0.2}$, tj. $p_i(560) / p_i(414) - 1$, za istu geometriju posude ($R_i/H=20$, ili $R_i/H=15$), je oko 27,8%. Ona malo zavisi od X_0 ($X_0 < 0,6$) i H (7,5 mm ili 10 mm). Međutim, relativno povećanje graničnog pritiska, $(p_f - p_i) / p_i$, se smanjuje od oko 6% do 4,5% kada se X_0 povećava od 0,2 do 0,6 za $R_{p0.2}=560$ MPa. Vrednosti relativnog povećanja $(p_f - p_i) / p_i$, za $H=15$ mm, 10 mm i 7,5 mm su manje nego za $H=100$ mm i $a_0=25$ mm, u skladu sa sl. 3.

Relativni ukupni stabilni rast prsline, $\Delta_f a / a_0$, smanjuje se sa povećavanjem a_0 (za $H=100$ mm i $a_0=25$ mm on iznosi 14%) i za svaku od tri razmatrane debljine zida je veći od 2% - vrednosti usvojene u ASTM E-399 za određivanje K_{Ic} (JUS C.A0.084).

Takođe, relativna promena p_i pri povećanju H od 7,5 mm na 10 mm za $a_0=1$ mm, $R_i=150$ mm, i $R_{p0.2}=560$ MPa je 36%, a za $a_0=2$ mm ona je čak 42%. Ova promena P_i data je dijagramski na sl. 5. za $R_{p0.2} = 414$ MPa.

Let $p_i(414) = p_i(R_{p0.2}=414$ MPa) designed the p_i for $R_{p0.2}=414$ MPa at given length X_0 .

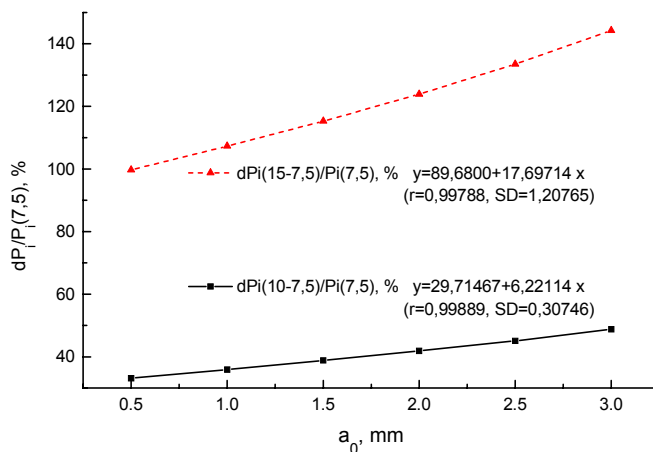
The relative change of p_i for given increase of $R_{p0.2}$, i.e. $p_i(560) / p_i(414) - 1$, for the same geometry of vessel ($R_i/H=20$, or $R_i/H=15$), is about 27,8%. It depends weakly on X_0 ($X_0 < 0,6$) and H (7,5 mm or 10 mm). However, the relative increase of limit pressure, $(p_f - p_i) / P p_i$, decreases from about 6% to 4,5% when X_0 increases from 0,2 to 0,6 for $R_{p0.2}=560$ MPa. Values of the relative increase, $(p_f - p_i) / p_i$, for $H=15$ mm, 10 mm i 7,5 mm are less than for $H=100$ mm and $a_0=25$ mm, according to Fig. 3

The relative total amount of stable crack growth, $\Delta_f a / a_0$, decreases with increasing a_0 , (it is equal 14% for $H=100$ mm and $a_0=25$ mm) and for each of three wall thicknesses considered is greater than 2% - the value accepted by the ASTM E-399 for K_{Ic} determination (JUS C.A0.084).

Also, the relative change of p_i for the increase of H from 7,5 mm to 10 mm and for $a_0 = 1$ mm, $R_i = 150$ mm, and $R_{p0.2}=560$ MPa is 36%, and for $a_0=2$ mm is even 42%. It is given by the diagram, Fig. 5, for $R_{p0.2} = 414$ MPa.

Količnik $dp_i(10-7,5)/p_i(7,5)$ daje relativno povećanje p_i kada se H menja od 7,5 mm do 10 mm (%). On slabo zavisi od izbora između dve date vrednosti $R_{p0.2}$. Povećanje H za 100% daje skoro tri puta veću relativnu promenu p_i u poređenju sa promenom p_i kada se H poveća za samo 33%.

Dijagram dat na sl. 5. pokazuje skoro idealne linearne zavisnosti sa koeficijentima korelacije oko 0,998.



Slika 5. Relativno povećanje p_i u zavisnosti od a_0 za promenu H od 7,5 mm do 10 mm (donja kriva) i od 7,5 mm do 15 mm (gornja kriva)

Figure 5. The relative increase of p_i versus a_0 for the change of H from 7,5 mm to 10 mm (the lower curve) and from 7,5 mm to 15mm (the upper curve)

Zavisnosti date na sl. 3. i 4. imaju široke opsege vrednosti dužine prsline – uprkos tome, one mogu dobro da se aproksimiraju linearnim funkcijama dužine, koje su skoro idealne u užim područjima dužine, kao što je pokazano u /8/. Na taj način, linearne relacije nađene u slučaju zateznih ploča /13/, mogu da se izvedu i u slučaju cilindrične geometrije.

ZAKLJUČAK

Inženjerski pristup daje proceduru procene za izračunavanje sigurnog opsega unutrašnjeg pritiska za cilindar sa unutrašnjom podužnom prslinom, koja omogućava da se materijal iskoristi u punoj meri.

LITERATURA – REFERENCES

1. T.L. Anderson, Fracture mechanics-fundamentals and applications, CRC press Inc. 1995. Texas
2. V. Kumar, M.D. German, C.F. Shih, An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis, NP-1931, Research Project 1237-1, General Electric Company, New York 1981.
3. R.B. King, Elastic - plastic analysis of surface flaws using a simplified line - spring model, Engin. Fracture Mechanics Vol. 18, No 1, pp. 217 - 231, 1983.
4. M. Kirić, A. Sedmak, A. Fertilio, The prediction of ductile fracture for axially cracked pressure vessels, 4. Internat. Symposium DEMI 2001, Banja Luka (RS) 25-26 aprila 2001, Book of references, pp. 127-132.

The quotient $dp_i(10-7,5)/p_i(7,5)$ gives p_i relative increase when H changes from 7,5 mm to 10 mm (%). It weakly depends on the choice between two given $R_{p0.2}$ values. The H increase by 100% produces almost three times greater relative p_i change comparing to p_i change when H increases by only 33%.

The diagram given in Fig. 5 shows almost ideal linear regressions with correlation coefficients close to 0,998.

Dependences shown in Figs. 3 and 4 have broad range of crack length values – in spite of it, they can be well approximated by linear functions of length, which are almost ideal in narrower ranges of lengths, as it has shown in /8/. Thus linear relations found in the case of tensile plates /13/, can be derived in the case of cylindrical geometry, too.

CONCLUSION

The engineering approach yields the estimation procedure for calculation of internal pressure safety range for a cylinder with an internal axial crack, taking advantage of the material's full load carrying capabilities.

5.M. Kirić, A. Fertilio, Proc. 2nd Int. Symposium of Serbian NDT Soc., Zlatibor, Serbia (2000), p 74.

6.M. Kirić, A. Fertilio, Ocena zavarenih spojeva ultrazvukom prema kriterijumima kontrole kvaliteta i mehanike loma, Zavarivač Vol.40, 3/1995, str. 209-223.

7.M.Kirić, B.Grujić, A.Fertilio " Experiences in steel structure evaluation by means of ultrasonic attenuation measurement ", The 7th European Conference on advanced materials and processes "Euromat 2001", Rimini - Italy 10-14 june 2001, (poster presentation).

8.M.P. Vnuk, Projektovanje posuda pod pritiskom primenom dozvoljenog oštećenja na osnovu nelinearne mehanike loma, Eksploatacijske prsline u posudama pod pritiskom i rezervoarima-monografija sastavljena na osnovu predavanja na Šestoj međunarodnoj letnjoj školi mehanike loma (Vrdnik juna 1991.

god.), zajedničko izdanje: TMF - GOŠA, Beograd, Beograd 1994. god., str. 170-192.

9. M. Kirić, D. Đukanović, A. Fertilio, Experiences in steel structure evaluation by means of ultrasonic attenuation measurement, 4. Međun. savetovanje DEMI 2001, Banja Luka 25-26 aprila 2001, Zbornik radova str. 161-166.

10. A. Sedmak, H. A. Anyiam, Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije (Structural integrity assessment using fracture mechanics), Integritet i vek konstrukcija (2/2001), str. 67-73.

11. P. Agatonović, Različite strategije određivanja preostale čvrstoće i veka (Different strategies for evaluation remaining strength and life), Ibid 10, str. 75-89.

12. M. Kirić, A. Sedmak, M. Arsić, V. Aleksić, Primena dvoparametarskog pristupa mehanike loma na ocenu integriteta konstrukcija (The structural integrity assessment using two-parameters fracture mechanics) IRMES 2002, Jahorina (RS) 19-20 sept. 2002, str. 195-200.

13. M. Kirić, Linearne relacije između parametara mehanike loma u Kingovom modelu (Linear relations between fracture mechanics parameters in King's model), Zavarivanje i zavarene konstrukcije Vol.44, 3/1999, 5-18.

ELGA OPTIMATOR®



Ako je zavarivanje vaš izbor da se obogatite onda nipošto ne biste smeli da preskočite ovaj članak.

Radeći sa MIG/MAG i TIG postupcima zavarivanja lako je zaključiti koliko cena žice utiče na ukupnu cenu zavarivačkog rada. S druge strane, retko se ko dublje upušta u analizu kako potrošnja gasa utiče na tu krajnju cenu zavarivanja. U radu sa konvencionalnim materijalima i CO₂ zaštitnim gasom to i nije bila neka velika stavka u ukupnim troškovima. Međutim, tehnološki napredak diktira primenu novih materijala gde CO₂ ne može da zadovolji kao zaštitni gas, a to opet zahteva primenu raznih mešavina gasova koje su znatno skuplje čak i od argona.

Novi **ELGA OPTIMATOR®** ima osnovnu namenu da redukuje potrošnju zaštitnog gasa u proseku za oko 30 %. Za samo nekoliko meseci korišćenja ovaj uređaj otplaćuje sam sebe, a sve preko toga predstavlja čist profit.

Princip rada **ELGA OPTIMATORA®** prikazan je na dijagramu. Za razliku od klasičnih manometara, ovde imamo kontrolu protoka gasa na zadanom nivou već od prve sekunde. Takođe, taj početni protok gasa je približno ¼ od početnog protoka gasa na klasičnim manometrima. Druga, ništa manje važna činjenica je da niži početni protok gasa ima veliki uticaj na kvalitet zavarenog spoja jer smanjuje turbulenciju protoka gasa, a time i onečišćenje zavarenog spoj.

Daljom analizom dijagrama može se zaključiti da se najveće uštede mogu očekivati ne mestima gde se rade kraći spojevi. Ta ušteda može da se kreće i do 50%. Pod normalnim okolnostima korišćenja ova investicija se vraća 250% već u prvoj godini. Ako ove procenete pretvorimo u nešto opipljivo dobijamo: za tri godine korišćenja **ELGA OPTIMATORA®** uštedećete novca za jedan novi MIG/MAG uređaj za zavarivanje ili sa istom količinom gasa možete možete uraditi i do 50% više zavarenih spojeva nego obično.

ELGA OPTIMATOR® je dobitnik **VELIKE ZLATNE MEDALJE** na poslednjoj Međunarodnoj specijalizovanoj izložbi zavarivanja u Novom Sadu.

Više informacija o ovom proizvodu možete naći na Internet adresi: www.optimizer.elga.se ili www.refit.co.yu. Generalni distributer **ELGA OPTIMATORA®** je firma "REFIT" iz Beograda (011/ 511-400; 500-234).

