

FAILURE CASE STUDIES – knowledge base model

Ivan Samardžić
Marko Dundđer
Vedran Topić

Dr.sc. I. Samardžić, Associate Professor,
University of Osijek, Mechanical Engineering faculty in Slavonski Brod, Trg I.B.Mažuranić
18, 35000 Slavonski Brod

Mr.sc. M. Dundđer, Stjepana Radića 16/4, Novi Travnik, Bosna i Hercegovina
Vedran Topić, student, University of Osijek, Mechanical Engineering faculty in Slavonski
Brod, Trg I.B.Mažuranić 18, 35000 Slavonski Brod

Key words: zavarivanje, failure, baze znanja, model

ABSTRACT :

Pouzdanost zavarenih konstrukcija u eksploataciji značajna je kako sa stajališta sigurnosti za ljude, tako i sa stajališta zaštite čovjekovog okoliša i materijalnih dobara. Jedan od pristupa ka unapređenju pouzdanosti zavarenih konstrukcija je učenje na dosadašnjim otkazima zavarenih konstrukcija, koji na žalost nisu rijetkost ni danas. U radu se obrazlažu uobičajeni otkazi zavarenih konstrukcija, te model baze znanja o nekim dostupnim otkazima zavarenih konstrukcija. Studije slučaja otkaza zavarenih konstrukcija smatramo vrlo važnim kako za studente – buduće praktičare, tako i za inženjere – stručnjake iz prakse. Upoznavanje sa slučajevima otkaza i analizom istih, dolazi se do iskustava koja će unaprijediti pouzdanost novih zavarenih konstrukcija. Pored toga, obrazlažu se modeli za iskazivanje sigurnosti (pouzdanosti) zavara na konstrukcijama, te modeli za iskazivanje slabljenja osnovnog materijala zbog prisutnosti zavarenog spoja.

1. INTRODUCTION

Otkaz zavarenog proizvoda – zavarene konstrukcije nastupa u dva osnovna slučaja:

- ako radna i zaostala naprezanja prelaze dopuštena naprezanja, te
- ako je tijekom zavarivanja i/ili eksploatacije zavarenog proizvoda došlo do značajnog slabljenja na mjestu zavarenog spoja s obzirom na dominantni otkaz (otkaz sa najvećom vjerojatnosti pojavljivanja).

Posljedice otkaza zavarenih spojeva najčešće se izražavaju u:

- trenutnim ljudskim gubicima (broj poginulih i povrijeđenih),
- gubicima zbog zagađivanja biološke okoline (mogu uzrokovati kasnije bolesti i smrt ljudi, životinja i biljaka utječući na prehrambeni lanac u prirodi) i
- materijalnim gubicima (direktni i indirektni troškovi uzrokovani otkazom izraženi u novčanim jedinicama).

Failures could have fatal consequences. Here are some examples that happened during 1984: [1]

- explosion and destruction of storage of LPG (liquid gas) in Mexico city which caused death of 500 and wounded 7000 people.
- Tragedy of leaking poisoned materials in chemical factory in Bhopal, India. several thousands people died and many had series consequences to their health
- In Chicago Oil Co. vertical pressure vessel exploded (amin-absorber) and 17 people died.

Nastojanje je autora da kroz bazu podataka o dostupnim otkazima i oštećenjima zavarenih proizvoda, te analizama istih, daju doprinos pouzdanosti i sigurnosti kako postojećih tako i novih zavarenih proizvoda.

2. Uobičajeni načini i uzroci otkaza zavarenih spojeva

Uobičajeni otkazi zavarenih spojeva mogu se također podijeliti u dvije osnovne grupe: one kod koji se pouzdanost može osigurati odgovarajućim proračunima, te one kod kojih se pouzdanost osigurava uglavnom na osnovi odgovarajućih eksperimentalnih istraživanja i provjera. U tablici 1 navode se otkazi koji se mogu obuhvatiti proračunima, a uz svaki od otkaza navode se odgovarajuća svojstva koja su bitna sa stajališta pouzdanog rada zavarenog spoja.

Tablica 1. Uobičajeni otkazi zavarenih spojeva koji se mogu obuhvatiti proračunima i veličine kojima se osigurava od otkaza.

OTKAZ	SVOJSTVO	OZNAKA
1. Žilavi lom	Vlačna čvrstoća	R_m (MPa)
2. Krhki lom	Žilavost loma i dr.	K_{IC} , δ_C , J_{IC} , ...
3. Trajne deformacije	Naprezanje tečenja	R_t , $R_{0,2}$ (MPa)
4. Umor	Granica umaranja, Rast pukotine	R_u , (MPa), $\frac{da}{dN}$, (mm/br. promjena optereć.)
5. Puzanje	Granica puzanja	$R_m/100\ 000/T$, $R_{1\%}/100\ 000/T$, (MPa)
6. Gubitak stabilnosti	Stabilnost štapova, ploča i ljusaka	$F_{kritično}$, (N) $\sigma_{kritično}$, (Mpa)
7. Opća korozija	Otpornost na opću koroziju	C_r , (mm/god.)

U tablici 2 se navode ostali uobičajeni otkazi zavarenih spojeva kod kojih se pouzdanost ne može osigurati samo na osnovu proračuna, već su nužna odgovarajuća eksperimentalna istraživanja.

Tablica 2. Uobičajeni otkazi zavarenih spojeva kod kojih se pouzdanost osigurava na osnovi eksperimentalnih istraživanja i testova.

OTKAZ
1. ostali oblici korozije: korozija uz naprezanje, interkristalna korozija, selektivna, pitting, korozija u rascjepu (zazoru),
2. abrazija, erozija, kavitacija i slične pojave,
3. termički šokovi i termički umor,
4. propuštanje medija,
5. prevrtanje, klizanje, sudar, projektilno djelovanje, bičevanje,
6. razne kombinacije (korozija uz naprezanje, korozija uz umaranje...).
7. ostali otkazi

Analizom dostupne dokumentacije o otkazima zavarenih spojeva i zavarenih proizvoda došlo se do uobičajenih uzroka otkaza. Uobičajeni uzroci otkaza odnosno uzroci grešaka (odstupanja od zahtjevane kvalitete), koje mogu uzrokovati otkaz su:

1. Ugovorni zahtjevi za kvalitetu (nepovoljni, nejasni)
2. Konstrukcija: koncepcija, proračun i oblikovanje detalja
3. Materijal: neadekvatan izbor materijala, greške materijala
4. Tehnologija izrade i kontrole : izbor operacija, režimi, slijed operacija

5. Sredstvo rada: stroj, alat, mjerni instrument
6. Čovjek : radnik, konstrukter, kontrolor,...
7. Opći uvjeti: temperatura okoline, vjetar, vlaga, prašina, osvjetljenje, ...

Iako se neki od gornjih uzroka navode u izvještajima kontrole, šire gledano, iza svakog od navedenih uzroka uvijek stoji čovjek odnosno greška čovjeka. Napr. greška materijala ili greška konstrukcije nastaje neznanjem ili nesavjesnošću čovjeka. Svi navedeni uzroci grešaka i otkaza mogu se svesti na dva uzroka ovisna o čovjeku:

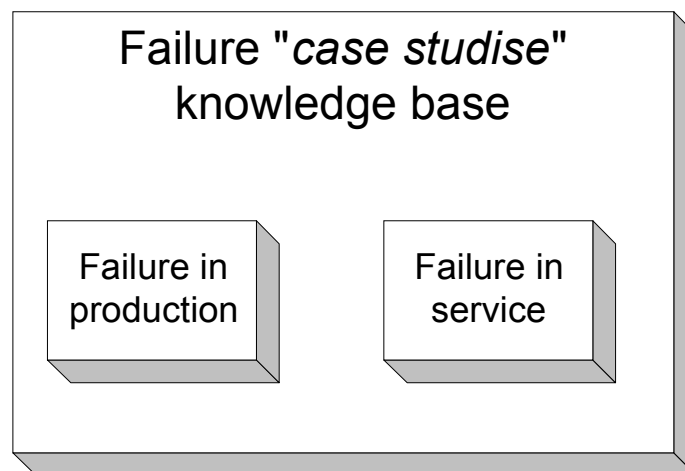
Znanje da se postave ispravni zahtijevi za kvalitetu-karakteristike, parametri, uvjeti, kriteriji prihvatljivosti: konstrukcija, dimenzije, materijal, tehnologija, kontrola, uvjeti eksploatacije.

Savjesnost (da se ispravno postavljene-napisane zahtijevi, postupci, ostali dokumenti, te kriteriji prihvatljivosti dosljedno provedu).

Sigurnost, pouzdanost i kvaliteta proizvoda ovise o čovjeku (znanju i savjesnosti čovjeka), pa čovjek treba biti u centru pažnje. Za najsloženije zavarene konstrukcije, kvaliteta i pouzdanost elemenata i sustava su bitni za izradu, ispravan i ekonomičan rad, te sigurnost ljudi i zaštitu biološke okoline u eksploataciji. U većini slučajeva, ne zbog neznanja, nego zbog ljudske greške-nesavjesnosti dolazi do otkaza s teškim posljedicama.

3. Failure “case studies” knowledge base model

Ideja da se stvori ovakva baza nastala je prije 10-ak godina, kada su autori u radovima [2],[3] prezentirali dio aktivnosti ispred istraživačkog tima. Model baze znanja o slučajevima otkaza i greškama na zavarenim spojevima i zavarenim konstrukcijama zamišljen je kao otvoreni sustav koji se može koristiti kao postojeći, ali isto tako se može širiti sa novim slučajevima otkaza. Iskustva o otkazima i greškama na zavarenim konstrukcijama teže su dostupna, ali su ipak dostupna. Analizom istih moguće je unaprijediti razinu znanja studenata i inženjera praktičara, te izbjeći ponavljanje istih grešaka u novim proizvodnim procesima. Shematski prikaz baze prikazan je na slici 1. Baza se dijeli u dva osnovna dijela: Otkazi-greške u proizvodnji i otkazi u eksploataciji. Uz svaki slučaj otkaza ili greške, bilo u proizvodnji ili u eksploataciji, pohranjuje se odgovarajuća analiza u kojoj su vidljivi uzroci i načini izbjegavanja grešaka.



Slika 1. Polazna koncepcija Failure “case studies” knowledge base

Na slici 2 se daje prikaz analize mogućih uzroka greške otkrivene u eksploataciji, što je korišteno kao ljuska baze o otkazima zavarenih spojeva na zavarenim konstrukcijama. Primjer se odnosi na zavarene proizvode kod kojih postoji povećana opasnost od otkaza (rizik od otkaza). Slični bi se algoritmi razvili i za ostale zavarene proizvode.

Primjenom "fuzzy logic control" moguće je izračunati vjerojatnost nastajanja otkaza s obzirom na pojedine utjecajne čimbenike. Isto tako, moguće je pohraniti praktične primjere koji govore o otkazu ili greški s obzirom na pojedine utjecajne čimbenike. U nastavku se iznosi jedan nedavni primjer "case study" iz prakse – pogreška zbog neodgovarajućih parametara naknadne toplinske obrade.

3.1. Pogreška zbog neodgovarajućih parametara naknadne toplinske obrade

Ova pogreška nastala je na komori pregrijača pare kotlovskog postrojenja. Kotlovsko postrojenje, odnosno kotao kao energetski objekt sastoji se od cijevnih zidova, sabirnih komora i cijevnih zmijsa (cijevi koje su savijene, a mogu biti dugačke i do 100 m, a oko kojih struje produkti izgaranja). U njima se proizvodi topla voda, para, pregrijana para i slični mediji. Izrađuju se uglavnom od niskougljičnih kotlovskih čelika, te niskolegiranih čelika, uglavnom legiranih Mo i Cr. Iz te grupe najpoznatiji, ali i najteži za zavarivanje X 20 Cr Mo V 1 2 1 (W.Nr. 1.4922).

Komore kao sakupljači vode i pare opterećeni su toplinski, mehanički (kavitacija), te dinamički zbog česte promjene tlaka unutar njih. To su izrazito zahtjevni i kompleksni dijelovi kotlovskog postrojenja (veliki broj zavarenih spojeva, raznovrsna opterećenja tijekom rada, koncentracije naprezanja, ...)

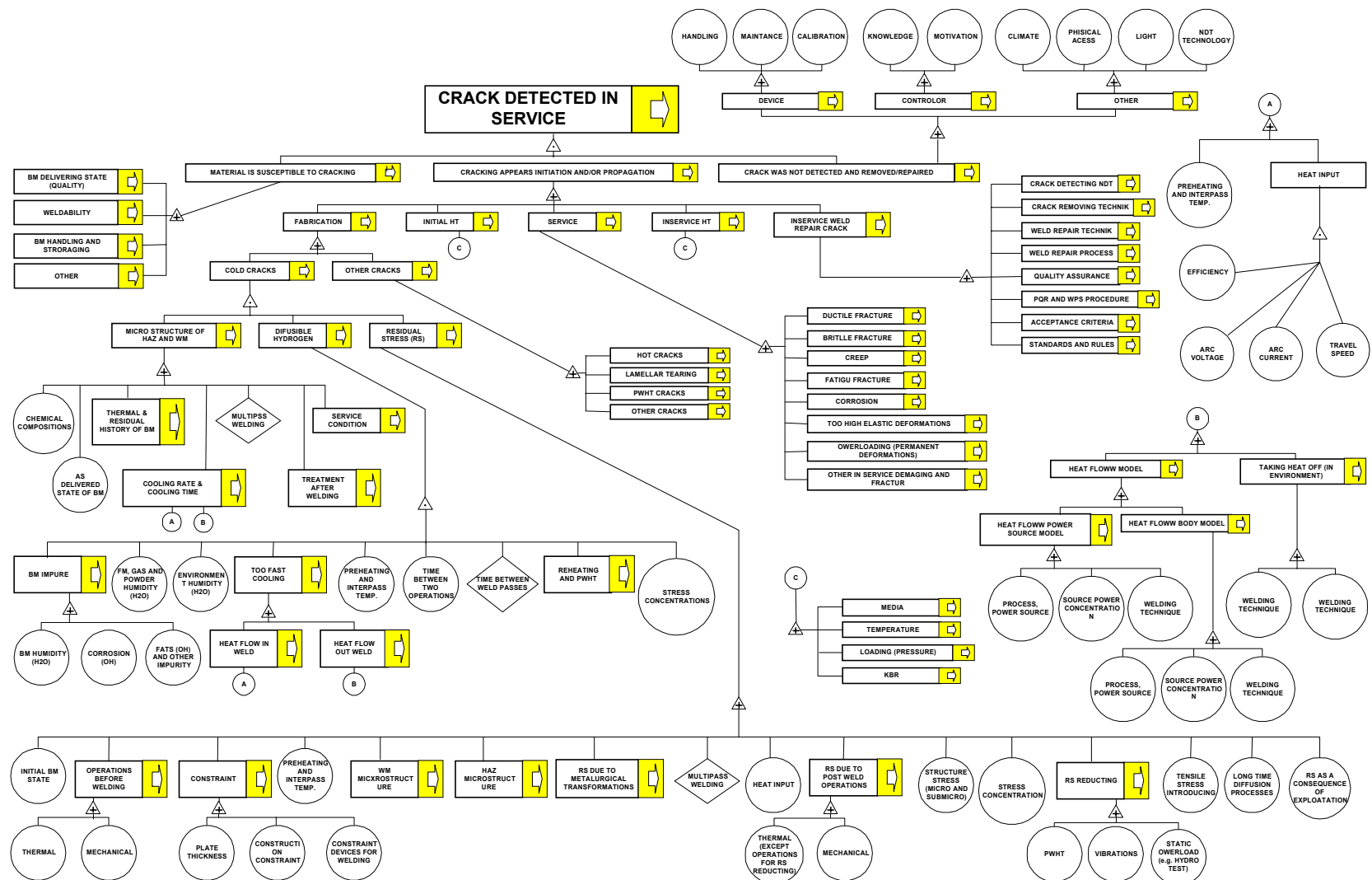
Pri izradi jednog kotla radnog tlaka 122 bara, i radne temperature 326 °C, a koji je ugovoren da se izradi prema ASME standardu, naručena je kod kooperanta komora od materijala kvalitete SA 106 Gr.B (ta kvaliteta približno odgovara materijalu St 45.8 - W.Nr. 1.0405 - prema DIN-u). Gabaritne dimenzije komore su $\varnothing$ 355,6 x 35,7 duljine 8825 (sastavljena iz dva komada duljine 4412,5 mm). (slika 2)

Komoru je koperant izradio toplim oblikovanjem, a isporučio ju je u ne normaliziranom stanju. Zahtjev od strane kupca kotla bio je da komora u sklopu kotlovskog postrojenja bude isporučena u normaliziranom stanju. Normalizacija je predviđena nakon potrebnih tehnoloških operacija na komori (sučeono zavarivanje komore radi produženja komore, strojna obrada komore bušenje, glodanje provrta za priključke koji dolaze na takve komore; napomena: na komori ima oko 244 priključka $\varnothing$ 57x5 mm, te 32 priključka $\varnothing$ 114,3x13,7 mm).

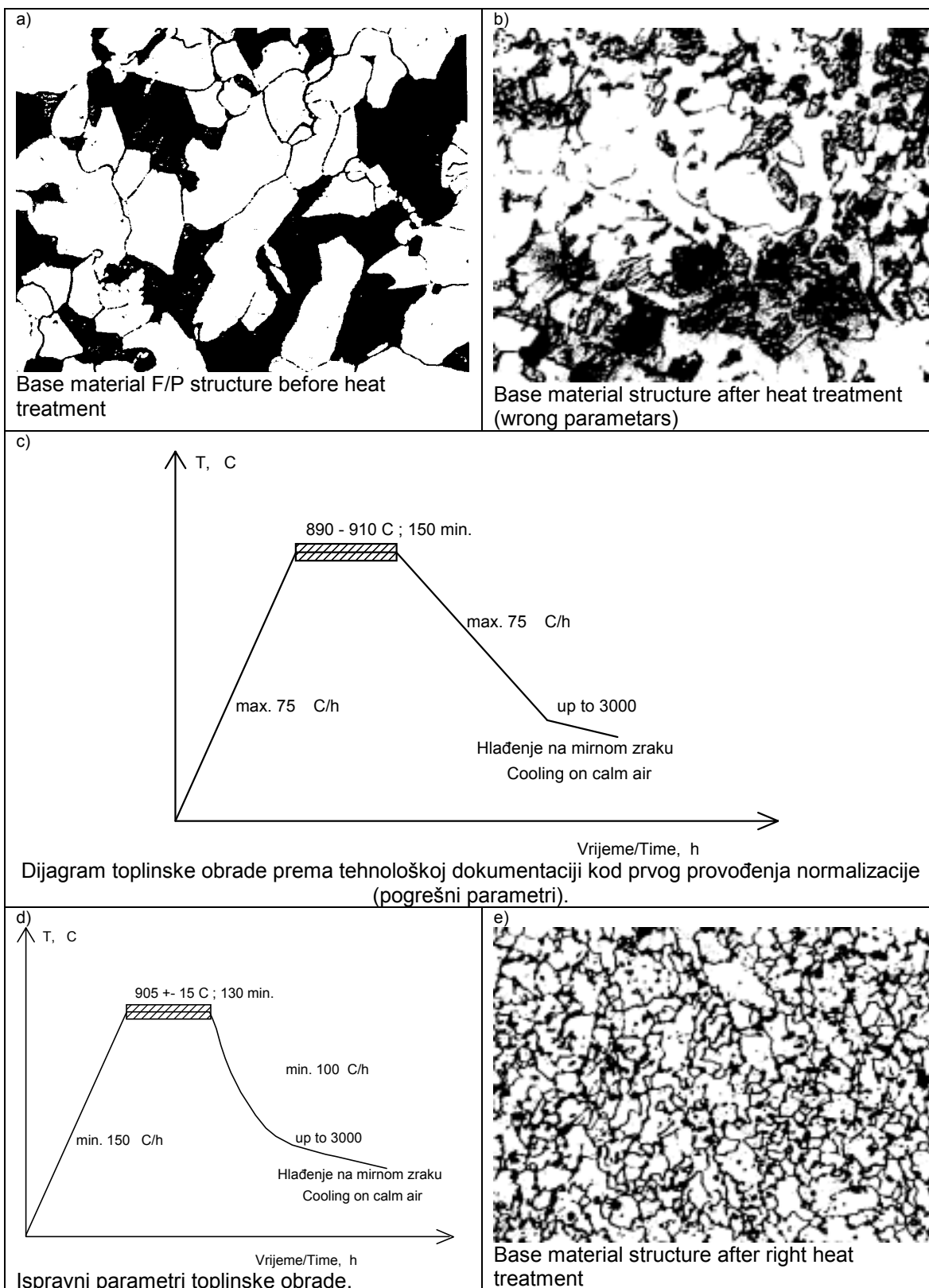
Prije toplinske obrade normalizacije napravljena je replika mikrostrukture prikazana na slici 3a. Na slici 3a se uočava feritno/perlitna nepotpuno normalizirana struktura, veličine zrna 5-7 po ASTM-u.

Toplinska obrada – normalizacija trebala je biti provedena prema dijagramu sa slike 2c. No, komora je nakon držanja na temperaturi normalizacije hlađena u peći, tako da je brzina hlađenja komore bila manja od dozvoljene. Posljedica je toga je mikrostruktura prikazana na slici 3b (došlo je do povećanja udjela ferita u odnosu na perlit, što ima za posljedicu pad čvrstoće i tvrdoće, a samim time i ostalih svojstava). Budući da nije dobivena normalizirana struktura, komora je morala biti škartirana. Samim time pričinjena je ogromna materijalna šteta, a nakon svega po hitnom postupku izrađena je nova komora koja je nakon pravilne toplinske obrade imala odgovarajuću mikrostrukturu i mehanička svojstva (slika 3d i 3e).

Iako je ovo tipična greška čovjeka, može se uočiti važnost ispravnog propisivanja parametara naknadne toplinske obrade zavarenih proizvoda i poluproizvoda, ali jednako tako i značaj dosljednog provođenja tih parametara tijekom provođenja iste.



Slika 2. Mogući uzroci greške otkrivene u eksploataciji za posude pod tlakom - zavarene proizvode s povećanim rizikom od otkaza



Slika 3. An example of “case study” - Pogreška zbog neodgovarajućih parametara naknadne toplinske obrade (slika b i c). Valjani parametri toplinske obrade i mikrostruktura dani su na slici d i e. Slika a pokazuje strukturu osnovnog materijala prije toplinske obrade.

4. Modeli pouzdanosti zavarenih spojeva i slabljenja na mjestu zavarenog spoja

Smisao analiza slučajeva otkaza je povećanje pouzdanosti i sigurnosti zavarenih spojeva i zavarenih konstrukcija. Pouzdanost zavarenih spojeva i slabljenje na mjestu zavarenog spoja (pokazatelj zavarljivosti) može se iskazati kvalitativno i kvantitativno. Pri izradi zavarenih proizvoda ako se raspolaže sa dovoljno velikim brojem numeričkih podataka o svojstvima osnovnog materijala, svojstvima zavarenih spojeva, te o djelujućim napreznjima za dominantni način otkaza, moguće je kvantitativno iskazati zavarljivost osnovnog materijala i pouzdanost zavarenog proizvoda. Postoji nekoliko mogućih pristupa kvantitativnom iskazivanju pouzdanosti i slabljenja zavarenih spojeva:[4],[5],[6]

- deterministički,
- poluprobabilistički i
- probabilistički pristup.

Na slici 4 se daje pojednostavljeni prikaz pristupa kvantitativnom iskazivanju pouzdanosti i slabljenja zavarenih spojeva.

Kod determinističkog se pristupa pouzdanost zavarenih spojeva i proizvoda osigurava preko faktora sigurnosti (S) koji uzima u odnos minimalnu vrijednost svojstva zavarenog spoj u odnosu na maksimalnu vrijednost djelujućeg napreznja, za dominantni otkaz zavarenog proizvoda. Dominantni otkaz je otkaz sa najvećom vjerojatnošću pojavljivanja, tj. otkaz protiv kojega se osigurava.

Kod poluprobabilističkog se pristupa pouzdanosti također uzima u odnos vrijednost svojstva zavarenog spoja u odnosu na vrijednost djelujućeg napreznja, za dominantni otkaz zavarenog proizvoda, ali uz određenu pouzdanost procjene (γ).

Probabilistički pristup pouzdanosti i slabljenju, koji je za razliku od determinističkog i poluprobabilističkog pristupa bliži realnosti, jer ima za polazište da su razmatrane veličine slučajne, a ne fiksne vrijednosti. Probabilistički pristup pouzdanosti i slabljenju koristeći teoriju vjerojatnosti polazi sa stajališta da postoje različiti načini slabljenja i različiti načini otkaza (svojevrni fenomeni), koji se uz uočavanje pojedinih utjecajnih čimbenika mogu razjasniti, tako da je moguće sagledavanje uzročno - posljedičnih veza.

Kod probabilističkog se pristupa pouzdanost zavarenog spoja ili proizvoda (R) definira se kao numerička vjerojatnost ispravnog funkcioniranja zavarenog spoja ili proizvoda u predviđenom vijeku i predviđenim uvjetima eksploatacije. Poželjno je da je pouzdanost što bliža vrijednosti 1, odnosno 100 %. Komplementarna vjerojatnost pouzdanosti je rizik (F).

Slabljenje zavarenih spojeva u odnosu na osnovni materijal je pokazatelj zavarljivosti osnovnog materijala i kvalitete zavarenih spojeva, pa se pod istim pojmom u literaturi mogu naći nazivi faktor slabljenja zavarenog spoja, faktor kvalitete zavarenog spoja ili faktor zavarljivosti.

Kod determinističkog se pristupa slabljenju zavarenih spojeva (V) uzima se u odnos minimalno svojstvo zavarenog spoja i minimalno svojstvo osnovnog materijala, za dominantni otkaz zavarenog proizvoda. Vrijednost slabljenja teorijski može biti manja, jednaka ili veća od 1. Ako bi dobivena vrijednost slabljenja bila veća od 1, to znači da bi u slučaju otkaza proizvoda u eksploataciji lom nastupio na osnovnom materijalu (na najslabijoj karici lanca pouzdanosti), pa se ovakav slučaj ne razmatra jer se očito ne radi o dominantnom otkazu zavarenog proizvoda. U praksi je najčešće zavareni spoj slabo mjesto na zavarenoj konstrukciji (koncentracije napreznja, strukturne i geometrijske greške, ...), pa je vrijednost slabljenja manja od 1.

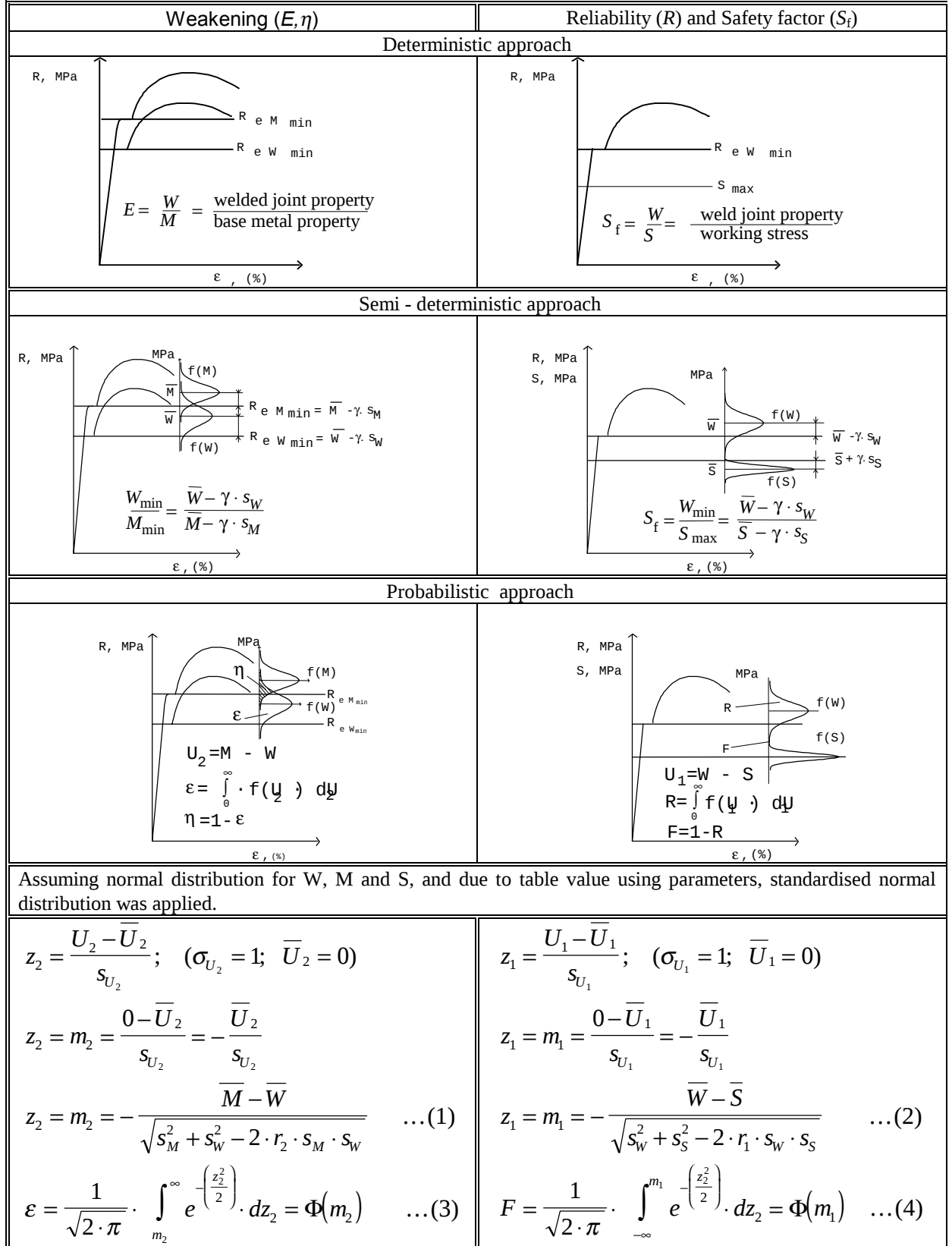


Fig. 4. Approaches to modelling of weakening and reliability. F .. probability of failure (unreliability) and η (E).. probability of $W \geq M$. η (E) reflects measure of weldability.

Ovisno o dobivenoj vrijednosti faktora slabljenja, zahtjevanoj klasi zavarenog proizvoda i zahtjevanim klasama zavarenih spojeva, prema odgovarajućim propisima usvaja se opseg kontrole kvalitete na zavarenoj konstrukciji metodama kontrole kvalitete bez razaranja.

Kod poluprobabilističkog se pristupa slabljenju također uzima u odnos vrijednost svojstva zavarenog spoja u odnosu na vrijednost svojstva osnovnog materijal, za dominantni otkaz zavarenog proizvoda, ali uz određenu pouzdanost procjene (γ).

Ko probabilističkog se pristupa slabljenje zavarenih spojeva (ε) definira se kao numerička vjerojatnost da će, s obzirom na dominantni otkaz zavarenog spoja, svojstvo zavarenog spoja biti lošije (manje) od svojstva osnovnog materijala u predviđenom vijeku i predviđenim uvjetima eksploatacije. Poželjno je da je slabljenja što bliža vrijednosti 0, odnosno 0 %. Komplementarna vjerojatnost slabljenju je iskoristivost svojstva osnovnog materijala (η). Kada bi bila vrijednost $\eta = \varepsilon = 0,5$ to bi značilo da su svojstva zavarenog spoja i osnovnog materijala potpuno jednaka, odnosno da zavarivanjem nisu narušena svojstva osnovnog materijala već da su ostala ista. Iskoristivost svojstva osnovnog materijala η iznad 0,5 ne bi imala praktičnog smisla, jer bi u slučaju eventualnog otkaza zavarenog proizvoda u eksploataciji, lom nastupio u osnovnom materijalu, pa bi se trebalo baviti mišlju kako odabrati bolji osnovni materijal ako je to moguće.

Kada se govori o slabljenju zavarenih spojeva u odnosu na osnovni materijal, treba uvijek imati na umu da se zavareni spoj sastoji od puno zona, te da pri tome pojedine zone mogu biti bolje ili lošije (ili jednake) u odnosu na zavareni spoj, s obzirom na dominantni otkaz zavarenog proizvoda. Na žalost, mora se naglasiti da se kod velikog broja otkaza zavarenih proizvoda u eksploataciji uzrok otkaza nalazio upravo u zavarenom spoju, odnosno slabljenju zavarenih spojeva.

Problem slabljenja posebno se naglašava kod zavarivanja uvjetno zavarljivih čelika, reparaturnih zavarivanja, zavarivanja aluminijskih legura, a u novije vrijeme i kod lijepljenih spojeva.

Primjer: Za posudu pod tlakom – vagnu cisternu 110 m³, prikupljena je dovoljna količina numeričkih podataka o naprezanju tečenja (yield point) za osnovni materijal i zavareni spoj. Podaci se pokoravaju normalnoj razdiobi, pa je za naprezanje tečenja osnovnog materijala M i zavareni spoj Z izračunate srednje vrijednosti i standardne devijacije. Isto tako je pretpostavljena normalna distribucija naprezanja u eksploataciji zavarenih spojeva. Dobiveni su podaci prikazani na slici 5.

Koristeći probabilistički model pouzdanosti zavarenih spojeva i slabljenja osnovnog materijala zbog zavarivanja, potrebno je izračunati:

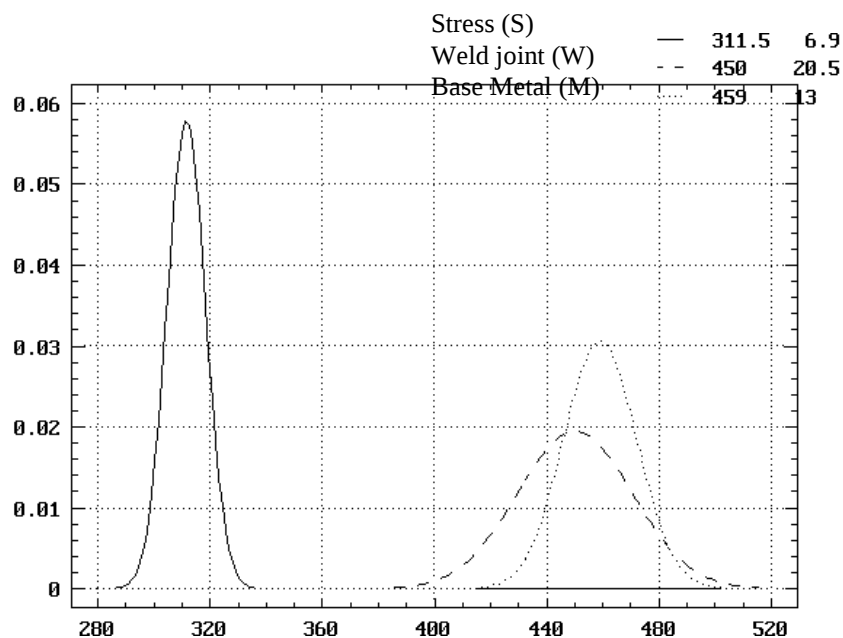
1. pouzdanost zavarenih spojeva s obzirom na mogući dominantni otkaz zbog trajnih deformacija, te
2. slabljenje na mjestu zavarenog spoja (to je pokazatelj zavarljivosti materijala).

Pomoću vlastitog računalnog programa 8koristeći formule 1 i 2 sa slike 4), za poznate podatke o naprezanju tečenja za osnovni materijal M i zavareni spoj W, te pretpostavljenu distribuciju vrijednosti djelujućih naprezanja izračunato je:

1. Prosječna vrijednost pouzdanosti za kritični otkaz zbog trajnih deformacija je $R = 0,9865876731 \cdot 10^{-9}$.

2. Prosječna vrijednost slabljenja za mogući otkaz zbog trajnih deformacija je $\varepsilon = 0,885$. Suprotna je vrijednost faktor iskorištenja svojstva osnovnog materijala $\eta = 1 - \varepsilon = 0,015$. Poželjno je da je svojstvo W što bliže ili bolje od svojstva M. Ako padaju u istu točku, tada je jednaka vjerojatnost slabljenja ε i iskoristivosti η , odnosno $\varepsilon = \eta = 0,5$. Ako bi

svojstvo W i bilo bolje od svojstva M, otkaz bi na konstrukciji nastupio na osnovnom materijalu M, pa tako iskoristivost veća od 0,5 nema praktičnog smisla. No, u praksi se često dešava da je neka od zona W bolja od M, ali sveukupno W ipak bude lošiji od M. Vrijednost iskoristivosti u našem primjeru pokazuje zadovoljavajuću zavarljivost za vrijednost $\eta=0,115$ (11,5%). Smanjivanjem vrijednosti η smanjuje se zavarljivost osnovnog materijala, a time i pouzdanost.



Slika 5. Distribucija frekvencija naprezanja tečenja za osnovni materijal M, zavareni spoj Z i pretpostavljena distribucija djelujućih naprezanja u eksploataciji N.

Kao što se vidi pouzdanost zavarenih spojeva s obzirom na mogući otkaz zbog trajnih deformacija je vrlo visoka (za slučaj predviđenih uvjeta eksploatacije, te za stohastički utvrđenu kvalitetu zavarenih spojeva uz dovoljnu pouzdanost procjene).

Conclusion

U radu se obrazlaže model baze podataka slučajeva otkaza iz eksploatacije i grešaka iz proizvodnje. Sistematizirane baze ovakvih podataka sa analizama uzroka otkaza / grešaka mogu poslužiti u edukativne svrhe, ali isto tako mogu pomoći i praktičarima neposredno pred proizvodnju zavarenih konstrukcija kod kojih postoji povećana mogućnost greške (napr. velika zastupljenost ljudskog rada, rad u terenskim i otežanim uvjetima, ...). Baza podataka je osmišljena da se može povezivati sa različitim korisničkim programima (napr. projektiranje tehnologije zavarivanja), ali se može koristiti i samostalno.

U drugom se dijelu rada detaljnije obrazlaže probabilistički pristup određivanju pouzdanosti zavarenih spojeva i slabljenja osnovnog materijala zbog zavarivanja. Na primjeru posude pod tlakom (vagonske cisterne 110 m³) izračunava se prosječna pouzdanost zavarenih spojeva i slabljenje osnovnog materijala zbog zavarivanja za dominantni otkaz – otkaz zbog prevelikih trajnih deformacija.

References

1. Samardžić I., Dunđer, M. Expert system model for pressure vessels control in service and

- repair welding. Međunarodno savjetovanje CIM 2000, Lumbarda, Korčula (Hrvatska), str.V29-V37, bibl. 5. UDK 621(063)658:52.011.56(063), ISSN 953-97181-0-4. Lukačević, Z.,.
2. Lukačević, Z., Gajzler, Z. Revitalization of mechanical components using expert system. XI international conference BIAM '92, Zagreb, 1992.
 3. Gajzler, Z. Revitalization of components in oil and petrochemical plants applying expert systems. International conference "Materials and welding in oil and petrochemical plants", Croatian Society for Welding Technique (Zagreb), Sisak 1992
 4. Lukačević, Z., Samardžić, I. Weldability analysis based on probabilistic approach to reliability and weakening of welded joint. 3rd International Seminar "Numerical Analysis of Weldability", Graz-Seggau, 25-27 Sept. 1995.
 5. Lukačević, Z., Samardžić, I. Reliability and Classification of Weldments. IIW Doc. XI-660-96. 49th Annual Assembly in Budapest, 1996, Commision XI "Pressure Vessels, Boilers and Pipelines".
 6. Lukačević, Z., Samardžić, I., Zdjelar, E. Approach to weldments reliability modelling. Japan-Slovak Welding Symposium, Kosice, 1996.

Acknowledgement. This publication is based on work sponsored by Ministry of Science and Technology of Croatia under project 152-004 and project 00-114.

