

IMPLANTNA TRDNOST TREH OGLJIKOVIH KONSTRUKCIJSKIH JEKEL

THE IMPLANT STRENGTH OF THREE STRUCTURAL CARBON STEELS

Tomaž Vuherer¹, Vladimir Gliha¹, Anton Vavpotič²

¹Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

²Montavar, Cesta ob ribniku 41, 2204 Miklavž na dravskem polju, Slovenija
tomaz.vuherer@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2001-11-15; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-05-05

V predstavljenem delu smo študirali občutljivost treh jekel za pokljivost v hladnem pri uporabi implant-preizkusov. Ta vrsta pokljivosti se pojavi v varu ali v toplotno vplivanem področju v odvisnosti od tega, kateri del zvara je bolj kaljiv. Odločilni dejavniki za pojav pokljivosti v hladnem so vodik, kaljene strukture in zaostale napetosti. Trajna implantna trdnost je prag napetosti, pri kateri pri danih pogojih ne pride do pokljivosti v hladnem v grobozrnatem delu toplotno vplivanega področja preizkušanelega jekla. To smo določili pri jeklih CrNiMoV, CrMoV in SUMITEN 80 P pri različnih pogojih. Pri tej raziskavi je zmanjšanje vlage v dodajnem materialu in predgrevanje močno povečalo implantno trdnost.

Ključne besede: pokljivost v hladnem, implant-preizkus, implantna trdnost, var, toplotno vplivano področje

In the presented research work the sensitivity of three steels on cold cracking were studied using an implant test. Cold cracking appears in the weld metals or in the heat-affected zones, depending on which part of the weld joint is more hardenable. The crucial factors for cold cracking are hydrogen, the hardened microstructure and the residual stresses. The implant strength is defined as the threshold stress for the appearance at no cold cracks in the coarse-grain heat-affected zone under certain condition. The implant strengths were determined on CrNiMoV steel, CrMoV steel, and SUMITEN 80 P steel under different conditions. In the presented research the lowering of the humidity in the consumable and preheating drastically increase the implant strength.

Key words: cold cracking, implant test, implant strength, weld metal, heat-affected zone

1 UVOD

Pri varjenju ogljikovih konstrukcijskih jekel s povišano trdnostjo se pokljivost v hladnem pojavi v varu ali na toplotno vplivanem področju (TVP). Za nastanek razpok v hladnem mora biti v materialu raztopljen vodik, pri ohlajanju mora nastati trda mikrostruktura, material s tako mikrostrukturo se mora nahajati v nateznem napetostnem polju.

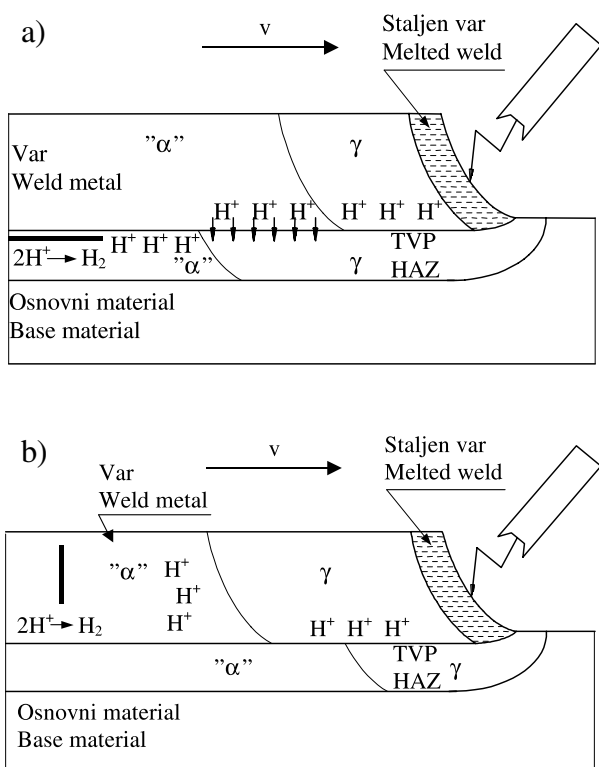
Vodik se lahko na mestu varjenja znajde iz različnih vzrokov, kot na primer zaradi vlage v atmosferi, onečiščenih površin pri varjenju, vlažnega dodajnega materiala, lahko izvira iz samega materiala itd. Zaradi visoke temperature obloka voda v njem disociira, nastali vodik pa se raztopi v talini. Ta vodik ima veliko sposobnost difuzije v trdnem materialu.

Hitrosti ohlajanja pri varjenju so velike, zlasti pri manjših vnosih toplote. Prav hitrost ohlajanja ima odločilno vlogo pri izoblikovanju mikrostrukture v varu in v TVP. Čim večje so hitrosti ohlajanja, tem trši bo material. Če je hitrost zelo velika, lahko pričakujemo celo nastanek martenzita. Na hitrost ohlajanja lahko vplivamo s predgrevanjem.

Kaljivost ogljikovih konstrukcijskih jekel se meri s parametrom C_E . Od kemične sestave osnovnega in dodajnega materiala je odvisno, kateri del zvara je bolj

občutljiv za pojav razpok v hladnem. Občutljivost ogljikovih jekel za pokljivost v hladnem se meri s parametrom P_{CM} .

Če je osnovni material pri določeni hitrosti ohlajanja z najvišjih temperatur pri varjenju bolj kaljiv kot material vara, pomeni, da ima višji tudi parameter P_{CM} in da je bolj občutljiv za pojav razpok v hladnem. Razpoke v hladnem v tem primeru nastanejo v TVP. Takšen primer prikazuje **slika 1a**. V avstenitnem področju γ je lahko raztopljena večja količina vodika H^+ kot po premeni v α -področju. Ker ima osnovni material višji P_{CM} kot var, nastopi v TVP premena kasneje kot v varu. Ko var že prestane premeno, se TVP še ni transformiral. Vodik iz vara difundira v TVP, ker je topnost v avstenitu večja. Največ vodika se nabere v grobozrnatem delu TVP tik ob črti taljenja, ker za difuzijo na večje razdalje zmanjka časa, saj se TVP hitro ohlaja. Po nekem času nastopi premena tudi v TVP in sposobnost raztapljanja vodika je močno zmanjšana. Na mikrostrukturno ugodnih mestih pride do njegove rekombinacije v molekularno obliko. Posledica je povečan tlak, ki z naraščanjem količine molekularnega vodika sčasoma tako močno naraste, da povzroči zelo velike napetosti. Tem se premalo duktilna trda mikrostruktura ni sposobna upirati. V sodelovanju z nateznimi zaostalimi napetostmi se zato sčasoma pojavijo razpoke v hladnem.



Slika 1: Shematičen prikaz nastanka razpok v hladnem a) $P_{CM\ var} < P_{CM\ OM}$ b) $P_{CM\ OM} < P_{CM\ var}$
Figure 1: Sketch of cold cracks' formation a) $P_{CM\ var} < P_{CM\ OM}$ b) $P_{CM\ OM} < P_{CM\ var}$

Glede na smer varjenja so nastale razpoke v hladnem v TVP različno usmerjene. Najpogostejše pa so to vzdolžne razpoke v hladnem. Razlog so velike natezne prečne zaostale napetosti v TVP, ki so navadno večje od vzdolžnih.

Če pa ima osnovni material nižji P_{CM} kot material vara, je za pokljivost v hladnem bolj občutljiv material vara. Ta primer je prikazan na **sliki 1b**. Premena nastopi prej v TVP kot v varu. Zato vodik sploh ne difundira iz vara v TVP, ampak tam ostane. Ko premena nastopi tudi

v varu, se sposobnost raztapljanja vodika v njem zmanjša. Vodik se izloča in se kopiči na napakah. Odvija se podoben proces, kot je prej opisano v TVP. V varu se pojavijo razpoke v hladnem najpogosteje prečno na os zvara. Razlog za to so velike natezne vzdolžne zaostale napetosti v varu.

Zaostale napetosti v zvarnem spoju so posledica oviranega raztezanja in krčenja pri varjenju. Material se pri varjenju neenakomerno segreva in tudi neenakomerno ohlaja. Za vse to pa je vzrok "točkovni" vir toplote za taljenje materiala, ki se pri varjenju giblje. Nastale zaostale napetosti so po navadi blizu napetosti tečenja materiala in so največje prav v varu in TVP.

Mednarodni inštitut za varjenje (IIW) predvideva za preizkušanje občutljivosti materiala za pokljivost v hladnem uporabo različnih metod. Z nekaterimi preizkusi so dosegljivi kvantitativni, z drugimi pa le kvalitativni podatki o stopnji občutljivosti jekel za pokljivost v hladnem ¹.

V tej raziskavi smo se osredotočili na razpoke v hladnem, ki nastanejo v grobozrnatem delu TVP osnovnega materiala. Za to je primerno uporabiti implant-preizkus ali preizkus z vstavkom. Z njim določimo implantno trdnost varjenega materiala, ki pomeni prag, pri katerem se razpoke v hladnem v grobozrnatem delu TVP pri varjenju ne morejo več pojaviti.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

V pričujoči eksperimentalni raziskavi smo določili občutljivost treh jekel za pokljivost v hladnem. Uporabili smo implant-metodo in opredelili njihovo implantno trdnost. Preizkušali smo naslednja jekla: - CrNiMoV z oznako 15Ch2NMFA

- CrMoV z oznako 15ChMFA
- visokotrdnostno poboljšano SUMITEN 80 P

CrNiMoV-jeklo ima napetost tečenja $R_p = 500$ MPa. Kemična sestava jekla je prikazana v **tabeli 1**. CrMoV-jeklo ima napetost tečenja $R_p = 440$ MPa. Njegova kemična sestava je podana v **tabeli 2**. Obe jekli sta

Tabela 1: Kemična sestava jekla CrNiMoV (mas. %)
Table 1: Chemical composition of CrNiMoV steel (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu	P_{CM}
0,17	0,27	0,45	2,05	1,25	0,60	-	-	-	-	0,355

Tabela 2: Kemična sestava jekla CrMoV (mas. %)
Table 2: Chemical composition of CrMoV steel (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu	P_{CM}
0,17	0,27	0,50	2,69	0,06	0,61	0,30	0,016	0,013	0,06	0,413

Tabela 3: Kemična sestava jekla SUMITEN 80P (mas. %)
Table 3: Chemical composition of SUMITEN 80P steel (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu	P_{CM}
0,11	0,31	0,85	0,40	0,98	0,45	0,04	0,006	0,009	0,24	0,252

namenjeni za jedrske reaktorske posode. Kemična sestava jekla SUMITEN 80 P je prikazana v **tabeli 3**. To jeklo ima napetost tečenja 775 MPa. Namenjeno je za gradnjo močno obremenjenih tlačnih cevovodov in tlačnih posod.

Podložne plošče za implant-preizkuse na jeklih CrNiMoV in CrMoV so bile narejene iz jekla NIOMOL 490 K. Podložne plošče za implant-preizkuse na jeklu SUMITEN 80 P so bile iz jekla St 37-2. Kemična sestava jekel za podložne plošče je prikazana v **tabeli 4**. Za varjenje navarka pri preizkusih na jeklih CrNiMoV in CrMoV smo uporabili bazično opláščeno elektrodo EVB NiMo $\phi 4$ mm, na jeklu SUMITEN 80 P pa bazično opláščeno elektrodo LB 118 $\phi 4$ mm. Nesušena elektroda EVB NiMo je imela vsebnost vodika ~ 8,5 ml/100 g vara, elektroda, dve uri sušena na 350 °C, pa ~ 4,5 ml/100 g vara. Elektroda LB 118, sušena dve uri na 350 °C, je imela vsebnost vodika ~ 0,5 ml/100 g vara. Vnos toplote pri varjenju je bil 17 KJ/cm navarka ^{2,3}. Trajno implantno trdnost smo določili pri različnih stanjih, in sicer glede na stopnjo posušenosti opláščene elektrode in temperaturo predgrevanja. V **tabeli 5** je prikazan obseg opravljene raziskave. Oblika in dimenzije obeh uporabljenih vrst preizkušancev so prikazane na **sliki 2**.

Tabela 4: Kemična sestava jekel za podložno ploščo (mas.%)

Table 4: Chemical composition of backing-plate steels (wt.%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
NIOMOL 490 K	0,07	0,54	0,56	0,67	0,35	0,01	0,002	0,0008
St 37-2	0,17		1,40				0,045	0,045

Tabela 5: Obseg raziskav

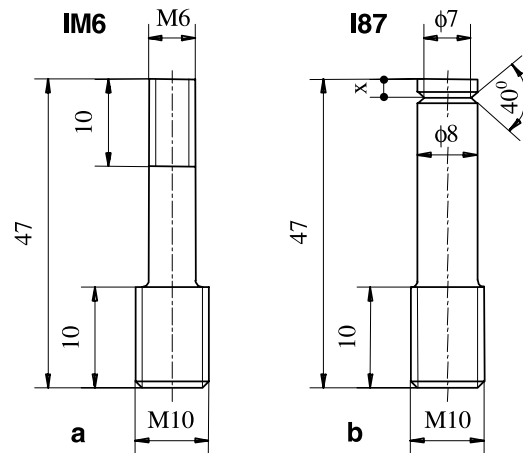
Table 5: Plan of research

Stanje / Material	CrNiMoV	CrMoV	SUMITEN 80 P
Nesušena elektroda Brez predgrevanja	• M6	• M6	–
Sušena elektroda Brez predgrevanja	• M6	• M6	• I87
Nesušena elektroda Predgrevanje 200 °C	• M6	• M6	–

Oznaki M6 in I87 pomenita vrsto implant-preizkušanca:

- preizkušanec z oznako M6 (**slika 2a**) ima vrezan metrski normalni navoj M6
- preizkušanec I87 (**sliki 2b**) ima vrezano krožno zarezo.

Pri preizkušancih s krožno zarezo moramo poskrbeti, da se po varjenju navarka njen dovolj velik del nahaja na grobozrnatem delu nastalega TVP. Ta pogoj je izpolnjen, če je v prečnem prerezu preizkušanca na zarezi površina vara od 2 % do 20 % celotne površine prereza. Če nam tega pogoja pri varjenju navarka ne uspe izpolniti,



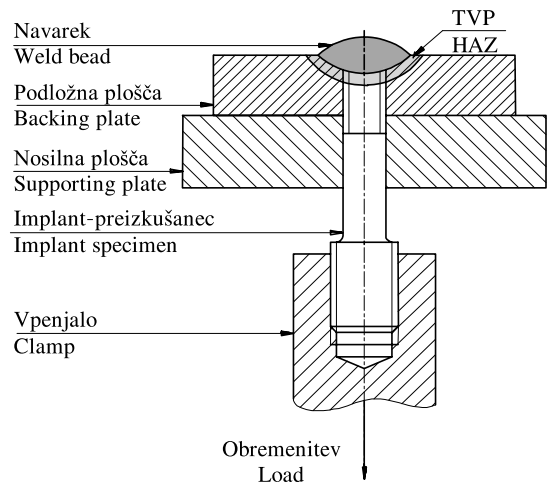
Slika 2: Implant preizkušanca, ki sta bila uporabljena v raziskavi
Figure 2: Implant specimens that were used in this research

preizkus ni veljaven. Oblika zareze pri preizkušancu M6 zagotavlja, da je ta zahteva vedno izpolnjena.

Ko so izpolnjene zahteve po potrebni prevaritvi zareze, so v implantu ob zarezi združeni vsi trije pogoji za nastanek razpok v hladnem:

- vodik je difundiral iz navarka v implant in se v njem akumuliral, saj je P_{CM} implanta večji od navarka;
- obstaja trdi grobozrnat del TVP, ki se je izoblikoval pod vplivom varjenja navarka;
- napetosti, ki so posledica obremenitve implanta, so zaradi vpliva koncentracije povečane.

Shema implant-preizkusa je prikazana na **sliki 3**. Implant vstavimo v podložno ploščo (200 mm x 150 mm x 20 mm), ki ima na sredini luknjo. Po podložni plošči preko površine vstavljenega implanta zavarimo navarek v dolžini 130 mm. Ko se implant oziroma navarek po varjenju ohladi na temperaturo 150 °C, postopoma obremenimo implant z vnaprej določeno natezno obremenitvijo. Obremenilna sila mora doseči predvideno velikost, še preden se implant ohladi pod 100 °C. Čas trajanja obremenitve do morebitne porušitve



Slika 3: Shema implant preizkusa
Figure 3: Sketch of implant test

implanta začnemo meriti, ko je preizkušavec dokončno obremenjen.

Vzrok za porušitev implanta pri nastavljeni obremenitvi so razpoke v hladnem, ki nastanejo v grobozrnatem delu TVP, v področju koncentrirane napetosti zaradi vpliva zarez. Če ni porušitve v času 24 ur (1440 min) sklepamo, da se na grobozrnatem delu TVP v implantu niso pojavile razpoke v hladnem. Kasneje takšne razpoke ne morejo več nastati, saj ves vodik z difuzijo zapusti TVP materiala, v katerem je bil pred tem raztopljen. Ker ni več izločanja vodika, ki bi zaostрил napetostne razmere v obremenjenem implantu, se pokljivost v hladnem ne more več pojaviti.

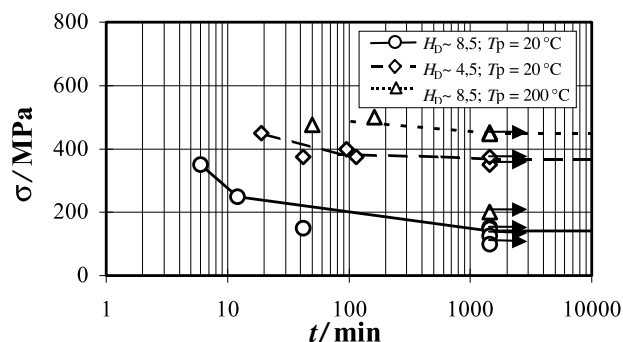
3 REZULTATI

Na **sliki 4** in **sliki 5** so prikazani rezultati treh skupin implant-preizkusov na jeklih CrNiMoV in CrMoV. Vsaka skupina ustreza enemu stanju pri izvedbi preizkusov (**tabela 5**). Na **sliki 6** so prikazani rezultati implant-preizkusov na jeklu SUMITEN 80 P. To jeklo smo preizkusili le pri enem stanju.

4 RAZPRAVA

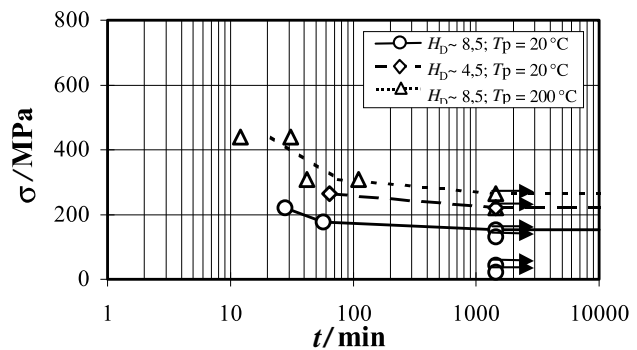
Najnižjo implantno trdnost smo izmerili pri varjenju navarkov z nesusušeno elektrodo pri preizkusih brez predgrevanja. Implantna trdnost jekel CrNiMoV in CrMoV je pri tem stanju približno enaka in je okrog 150 MPa. Pri jeklu CrNiMoV je to 30 % velikosti napetosti tečenja, pri jeklu CrMoV pa 35 %.

Če elektrode pred varjenjem navarka sušimo, kot predpisuje proizvajalec elektrod, se vsebnost vodika v elektrodah zmanjša iz ~ 8,5 ml/100 g na ~ 4,5 ml/100 g vara. To je razlog za povečanje implantne trdnosti, saj je pri manjši količini raztopljenega vodika potrebna večja napetost za pojav pokljivosti v hladnem. Pri jeklu CrNiMoV se tako implantna trdnost poveča na 375 MPa, kar je 75 % velikosti napetosti tečenja. Pri jeklu CrMoV smo izmerili znatno nižji implantno trdnost, le 220 MPa,



Slika 4: Določitev treh implantnih trdnosti pri jeklu CrNiMoV ⁴ za različna stanja (vsebnost vodika: 8,5 ml/100 g ali 4,5 ml/100 g zvara; brez predgrevanja ali z njim)

Figure 4: Determination of three implant strengths on CrNiMoV steel for different conditions ⁴ (content of hydrogen: 8.5 or 4.5 ml/100 g of weld; with or without preheating)



Slika 5: Določitev treh implantnih trdnosti pri jeklu CrMoV ⁵ za različna stanja (vsebnost vodika: 8,5 ml/100 g ali 4,5 ml/100 g zvara; brez predgrevanja ali z njim)

Figure 5: Determination of three implant strengths on CrMoV steel for different conditions ⁵ (content of hydrogen: 8.5 or 4.5 ml/100 g of weld; with or without preheating)

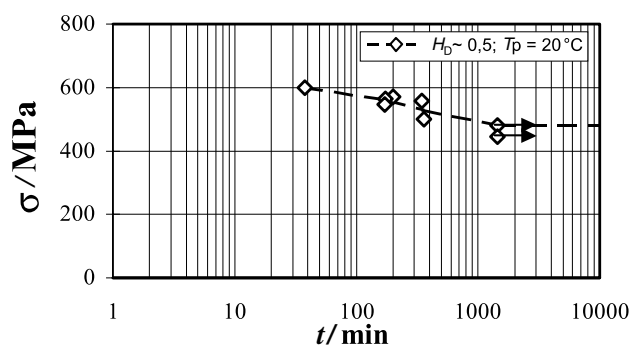
kar je komaj 50 % velikosti napetosti tečenja osnovnega materiala.

Pri jeklu SUMITEN 80 P je implantna trdnost okoli 490 MPa, kar je komaj nekaj čez 60 % velikosti napetosti tečenja tega jekla. To je dokaj nizko, če upoštevamo, da smo s sušeno elektrodo LB 118 v material vnesli le okoli 0,5 ml vodika na 100 g vara.

Ko smo pri preizkusih na jeklih CrNiMoV in CrMoV varili navarkov z nesusušeno elektrodo in ob tem predgrevali na 200 °C, se je implantna trdnost glede na enako količino vnesenega vodika seveda povečala. Pri jeklu CrNiMoV je bila 450 MPa, kar je kar 90 % velikosti napetosti tečenja osnovnega materiala. Pri jeklu CrMoV je bila implantna trdnost le 264 MPa, kar je samo 60 % velikosti napetosti tečenja.

Če primerjamo CrNiMoV in CrNiMo, ugotovimo, da je jeklo CrMoV bolj občutljivo za pokljivost v hladnem kot jeklo CrNiMoV. Kljub nizki implantni trdnosti pri uporabljeni nesusušeni elektrodi lahko to precej povečamo z zmanjšanjem količine vlage v oplaščenju elektrode. Predgrevanje na 200 °C ima še večji vpliv kot sušenje.

Rezultatov implant-preizkusov na jeklu Sumiten 80 P ne moremo tako enostavno primerjati z rezultati preizkusov na jeklih CrNiMoV in CrNiMo. Elektroda in



Slika 6: Rezultati implant-preizkusa pri jeklu SUMITEN 80 P ⁶ (vsebnost vodika: 0,5 ml/100 g zvara; brez predgrevanja)

Figure 6: Determination of implant strength on SUMITEN 80 P steel ⁶ (content of hydrogen: 0.5 ml/100 g of weld; without preheating)

vsebnost vlage sta različni, poleg tega pa tudi tip implanta ni bil isti.

5 SKLEPI

Ugotovitve so naslednje:

- CrMoV jeklo je bolj občutljivo za pojav razpok v hladnem kot jeklo CrNiMoV;
- jeklo Sumiten 80 P je zelo občutljivo za pokljivost v hladnem, vendar ga težko primerjamo z drugima dvema, saj ne gre za enaki vsebnosti vodika v elektrodi;
- zmanjšanje vsebnosti vodika v elektrodi s sušenjem elektrode vpliva na precejšen porast implantne trdnosti;
- zmanjšanje hitrosti ohlajanja, ki ga dosežemo s predgrevanjem, močno poviša implantno trdnost obeh jekel.

6 LITERATURA

- ¹ I. Rak: Technology of welding (in Slovene), Lecture note, High Technical School, Maribor, VTO strojništvo Maribor, 1981
- ² IIW French group: *Cold Cracking test Methods using Implants*, International Institute of Welding, doc. IIW IX-1240-82 (rev. 4), 1982
- ³ K. Satoh, S. Matsui, H. Horikawa, K. Bessyo, T. Okumura: *JSSC Guidance Report on Determination of Safe Preheating Conditions Without Weld Crack in Steel Structures*, International Institute of Welding, doc. IIW-IX-834-73, 1973
- ⁴ V. Gliha, T. Vuherer: *Report on Implant Testing*, Internal report – COST, Maribor, 2000
- ⁵ A. Vavpotič: *Implant-method in The Institute of Metalna* (in Slovene), Technical bulletin of the Metalna '84, Maribor 1984

