

Greške u zavarenim spojevima u izradi i u eksploataciji

Svaki tehnološki proces nosi stalnu opasnost od nastajanja određenih grešaka. S obzirom na veliki broj utjecajnih čimbenika na kvalitetu zavarenih spojeva, na tu je opasnost potrebno obratiti posebnu pozornost kako pri izradi zavarene konstrukcije, tako i u njoj eksploataciji. Postoje različite klasifikacije grešaka u zavarenim spojevima, a jedna od njih je sljedeća (EN 26520):

A. greške u zavarenim spojevima koje mogu nastati u izradi i

B. greške u zavarenim spojevima koje mogu nastati u eksploataciji.

Greške u zavarenim spojevima koje nastaju u izradi mogu se podijeliti s obzirom na:

1. Uzrok nastajanja:
 - konstrukcijske greške,
 - metalurške greške i
 - tehnološke greške.
2. Vrstu:
 - plinski uključci,
 - uključci u čvrstom stanju,
 - naljepljivanje,
 - nedostatak provara,
 - pukotine i
 - greške oblika i dimenzija.
3. Položaj:
 - unutrašnje greške,
 - površinske i podpovršinske greške i
 - greške po cijelom presjeku.
4. Po obliku:
 - kompaktne greške,
 - izdužene greške,
 - oštre greške (jako izraženo zarezno djelovanje),
 - zaobljene greške (manje izraženo zarezno djelovanje),
 - ravninske greške (može se zanemariti treća dimenzija greške) i
 - prostorne greške (uzimaju se u obzir sve tri dimenzije greške).
5. Po veličini:
 - male greške,
 - greške srednje veličine i
 - velike greške.
6. Po brojnosti:
 - pojedinačne greške,
 - učestale greške i
 - gnijezdo grešaka.

Konstrukcijske greške nastaju zbog lošeg konstrukcijskog oblikovanja zavarene konstrukcije (npr. zavarivanje u nepristupačnom i skučenom prostoru, loše oblikovanje detalja na zavarenoj konstrukciji sa stajališta dinamičke izdržljivosti, i dr.).

Metalurške greške vezane su uz metalurške, termodinamičke i hidrodinamičke pojave koji prate proces taljenja materijala, kristalizacije i hlađenja zavarenog spoja. Greške ovog tipa mogu biti različite vrste pukotina, pore, uključci, troska, previše zakaljena struktura i dr.

Tehnološke greške posljedica su loše propisane tehnologije zavarivanja ili što je češći slučaj u praksi, a to je da se kvalitetno propisana tehnologija zavarivanja ne provodi u potpunosti pri zavarivanju konstrukcije. Da bi se osiguralo provođenje propisane tehnologije zavarivanja kod odgovornijih zavarenih konstrukcija često puta je potreban nadzor (interni i/ili eksterni) i praćenje kako stabilnosti procesa zavarivanja, tako i kvalitete rada pojedinih zavarivača i pogona. Najčešće greške iz ove skupine su: zajede, naljepljivanja, nedostatak provara, prokapljine, krateri, neodgovarajuće dimenzije zavarenog spoja i konstrukcije, prevelike deformacije i napetosti, ...).

Daleko najopasnije greške u izradi zavarenih konstrukcija su pukotine, a one mogu biti:

- **hladne (Cold cracking),**
- **tople (Hot cracking),**
- **uslijed naknadne toplinske obrade (Post weld heat treatment cracking) i**
- **uslijed slojastog ili lamelnog odvajanja (Lamellar tearing).**

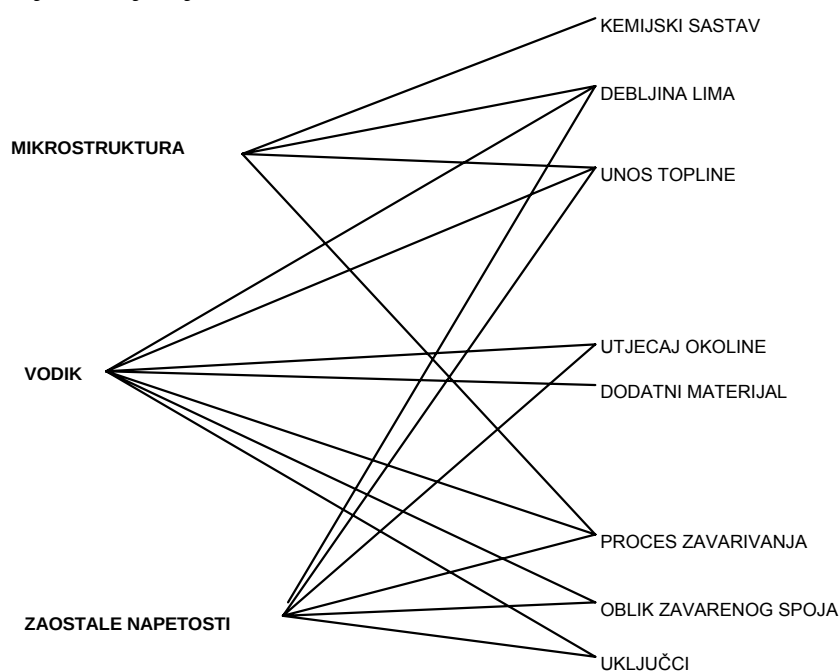
Kada se radi o površinskim pukotinama i pukotinama kroz cijeli debljinu lima, pokazalo se da se najbolje otkrivaju metodom penetrantske kontrole i magnetskom metodom (uz obaveznu vizualnu kontrolu prije svih kontrola, pomoću odgovarajućih povećala i osvjetljenja). Pukotine u unutrašnjosti lima mogu se otkriti ultrazvučno metodom.

Globalno gledajući, u praksi se najčešće susreću hladne pukotine, ali se jednako ozbiljno trebaju shvatiti i ostale pukotine, jer svaka pukotina u uvjetima koji pogoduju širenju pukotine može dovesti do otkaza zavarenog spoja ili proizvoda u eksploataciji.

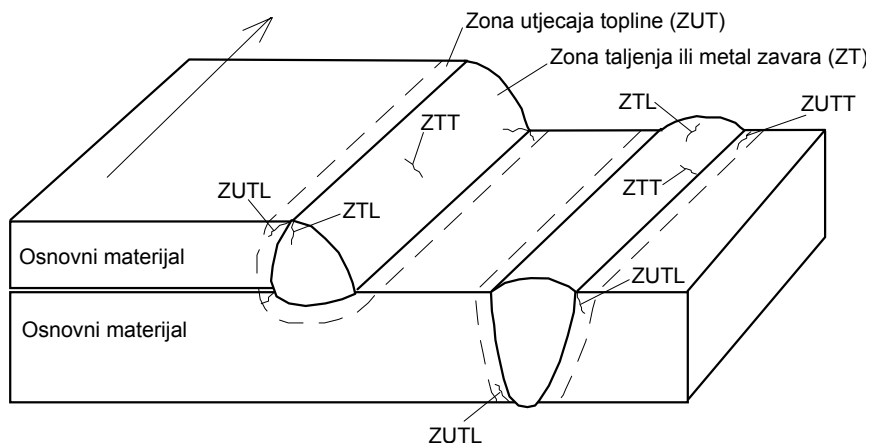
Hladne pukotine nastaju pri hlađenju zavarenog spoja na temperaturi ispod 200 °C, a čak mogu nastati i nekoliko dana nakon zavarivanja, pa su tako u tom slučaju dobile naziv "zakašnjele" hladne pukotine. Kontrolu kvalitete metodama bez razaranja na zavarenim konstrukcijama potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja (to se smatra inkubacijskim periodom nastajanja zakašnjelih hladnih pukotina), kod čelika koji pokazuju sklonost prema nastajanju hladnih pukotina. Hladne pukotine mogu nastati u zoni taljenja i u zoni utjecaja topline, a mogu biti orijentirane u smjeru uzdužne osi zavarenog spoja, okomito ili pod nekim kutem u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja. Tri su osnovna uzroka nastajanja hladnih pukotina, a to su:

- sklonost materijala prema zakaljivanju (ocjenjuje se preko različitih eksperimentalno dobivenih formula za ekvivalent ugljika),
- postojanje zaostalih napetosti (mogu se mjeriti jednom od tenzometrijskih metoda ili procjenjivati s obzirom na debljinu materijala, oblik i položaj zavarenog spoja na konstrukciji, gustoći toplinskog toka i količini unešene energije) i
- količina difuzijskog vodika (može se eksperimentalno odrediti, npr. glicerinskom metodom).

Za nastajanje hladnih pukotina nužna su sva tri navedena uzročnika, a vjerojatnost nastajanja je tim veća što je veći njihov utjecaj.

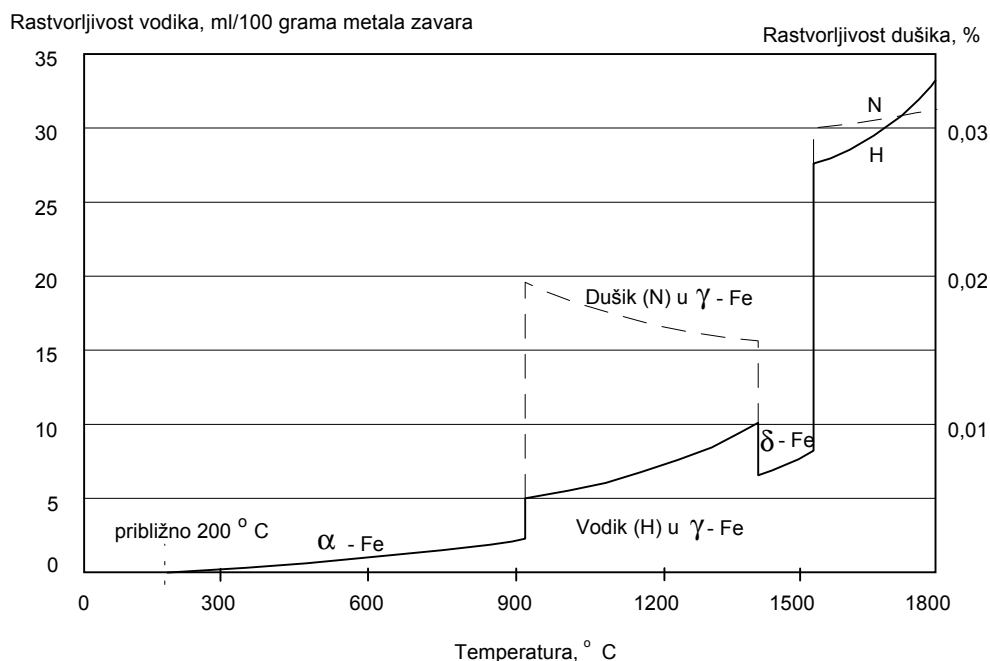


Hladne pukotine mogu nastati u metalu zavora (zoni taljenja) i/ili zoni utjecaja topline. Mogu biti paralelne ili pod nekim kutem u odnosu na uzdužnu os zavarjenog spoja, pa se tako, s obzirom na smjer rasprostiranja govori o longitudinalnim (L) i transferzalnim (T) pukotinama. Prijelomna površina je svijetla, za razliku od toplih pukotina gdje dolazi do površinske oksidacije toplih pukotina koje nastaju na povišenim temperaturama.



Lokacije i orijentacije hladnih pukotina prema IIW (international Institute of Welding).

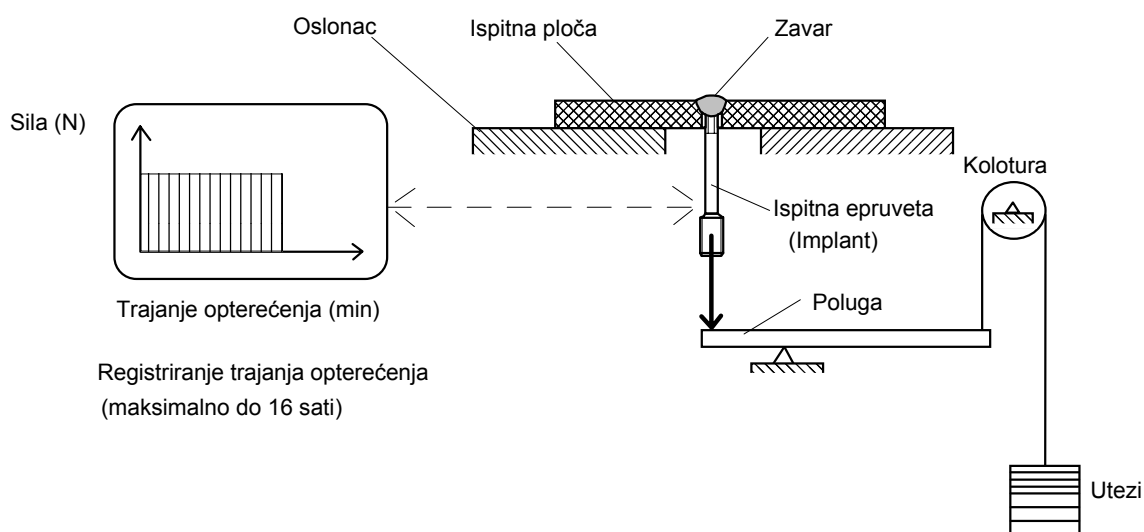
Ponekad vodik ostaje zarobljen u zavarjenom spoju, ne izazove pukotine, ali se na površini loma (napr. epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće, loma zavarjenog spoja u eksploataciji, ...) mogu uočiti tzv. "riblje oči" i "pahuljice". To su mjesta gdje se nakupio vodik koji nije efundirao iz zavarjenog spoja, pa predstavljaju diskontinuitet u zavarjenom spoju (smanjen nosivi presjeka, zarezno djelovanje, ...). Rastvorljivost vodika i dušika u čistom željezu prikazana je na sljedećoj slici.



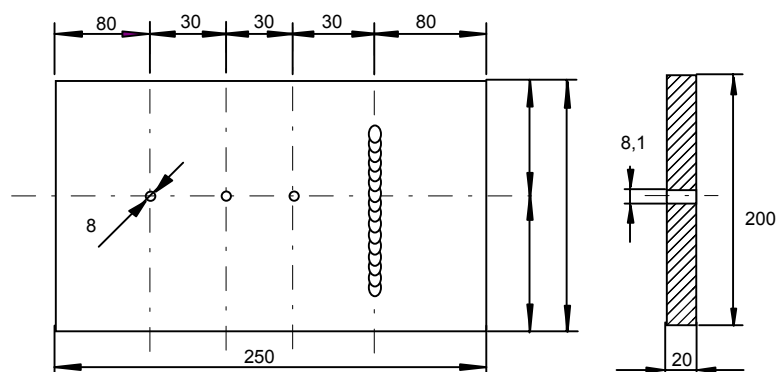
Sklonost hladnim pukotinama procjenjuje se analitički na osnovi različitih formula za ekvivalent ugljika (pokazuju sklonost zakaljivanju i nastajanju hladnih pukotina), a za eksperimentalno istraživanje postoji čitav niz laboratorijskih i pogonskih metoda.

U nastavku se daju češće korištene eksperimentalne laboratorijske i pogonske probe zavarljivosti za procjenu sklonosti materijala prema nastajanju hladnih pukotina.

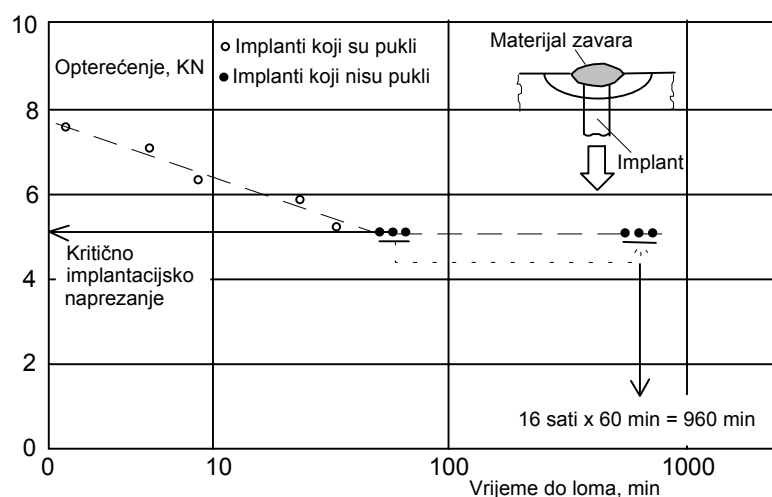
Implant metoda (daje kvantitativne pokazatelje, tzv. kritična implantacijska naprezanja).



Shematski prikaz uređaja za ispitivanje po Implant metodi



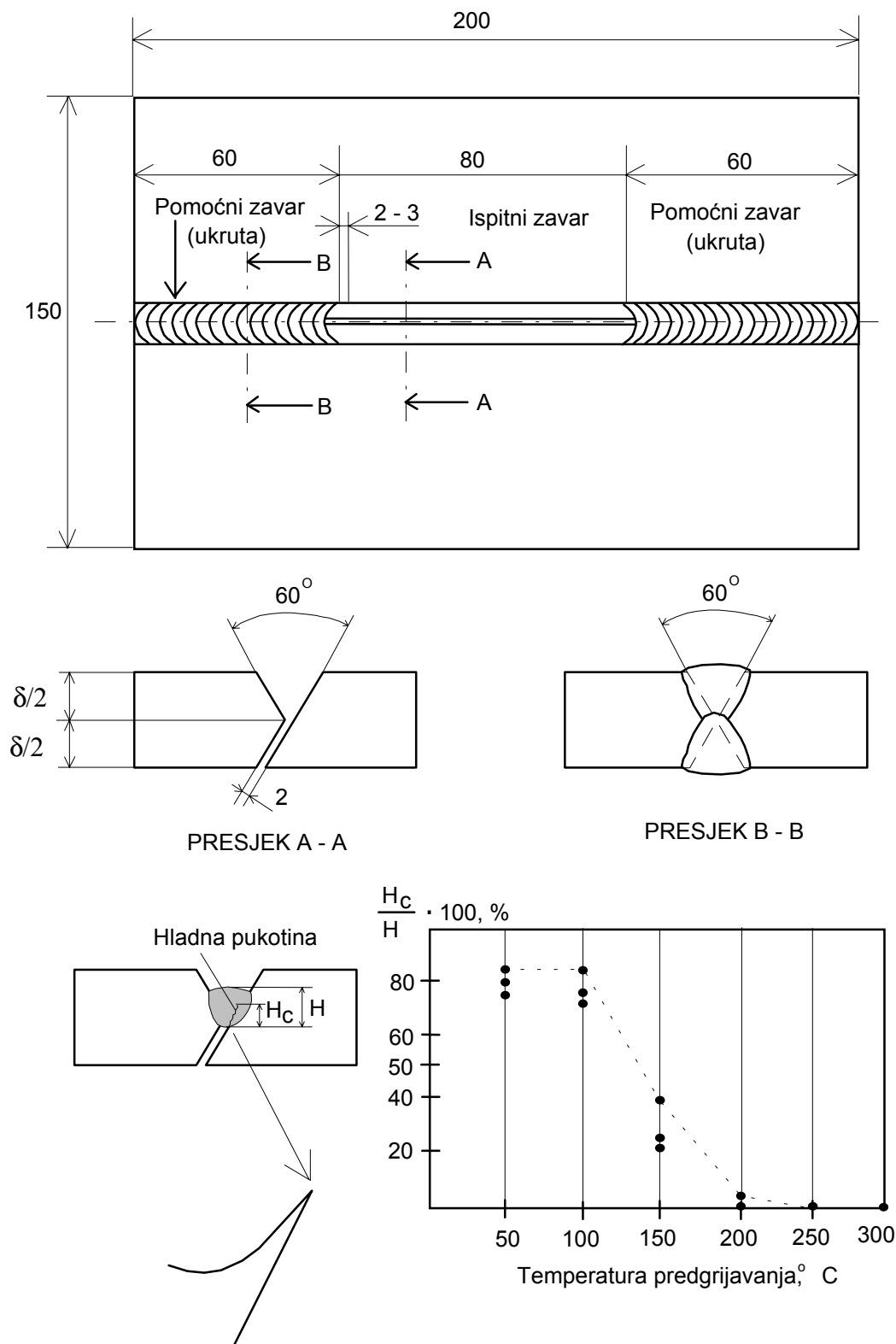
Izgled ispitne ploče za ispitivanje po Implant metodi



Dijagram opterećenja implant – epruveta tijekom vremena do loma

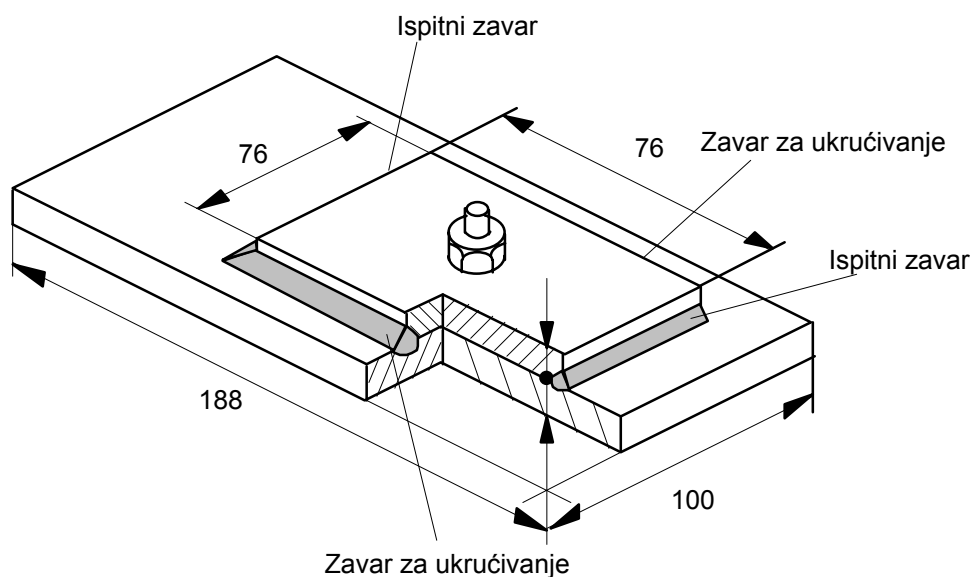
Kada se opterećenje podijeli sa površinom poprečnog presjeka implanta – epruvete, dobiju se vrijednosti implantacijskog naprezanja. Ono naprezanje kod kojega dolazi do loma implanta – epruvete naziva se kritično implantacijsko naprezanje. Poželjno je da je ono što više, jer je tada bolja zavarljivost materijala. Kako se povećava sadržaj difuzijskog vodika, razina zaostalih napetosti i zakaljivost materijala, do loma epruvete dolazi ranije i kod nižih naprezanja. U tim je slučajevima kritično implantacijsko naprezanje niže, što je nepovoljno jer znači slabiju zavarljivost.

Tekken metoda (daje kvalitativne pokazatelje, tj. ima ili nema pukotina uz određenu tehnologiju i uvjete zavarivanja).

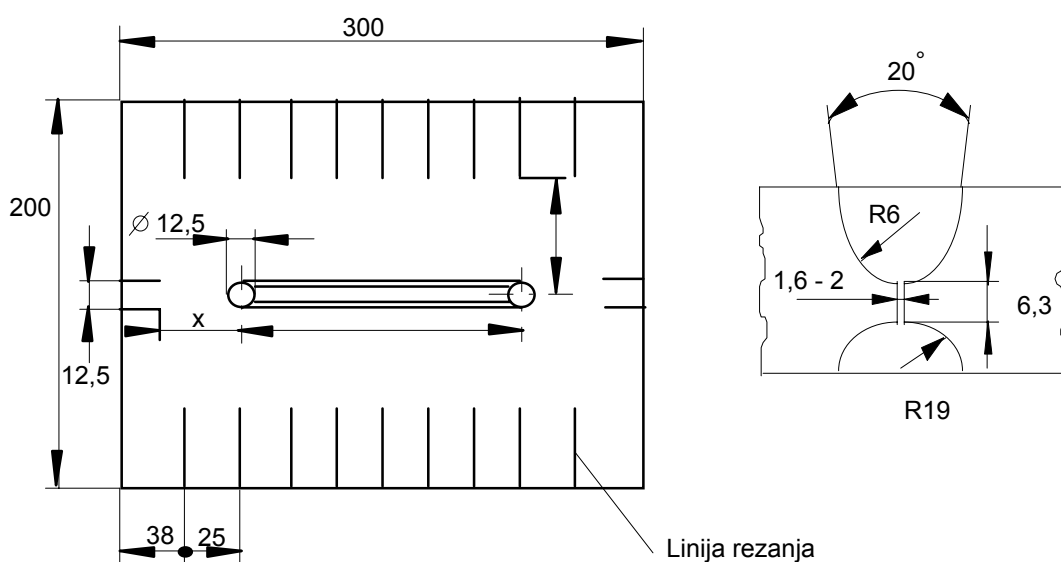


Shematski prikaz ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi

CTS (Control Thermal Severity – BS 709-1964) je metoda praktična za pogonska ispitivanja sklonosti kutnih zavarenih spojeva prema hladnim pukotinama. Ova metoda simulira različite modele vođenja topline (zavar uz rub ploče se brže hladi od onog koji je više udaljen od ruba ploče). Moguće je između ploča postaviti napr. podložnu pločicu, pa se osjetljivost metode na hladne pukotine značajno povećava. Prvo se izvede zavari za ukrućenje (bočni zavari) koji su nešto deblji od ispitnih. Ispitni su debljine 4 – 6 mm, duljine 75 mm. Nakon zavarivanja i hlađenja (uvažavajući inkubacijski period od 48 sati nakon zavarivanja), vrši se odgovarajuće isjecanje uzoraka i mikroskopska analiza zavarenih spojeva. Ovo je također kvalitativna metoda ispitivanja zavarljivosti.



Lehigh metoda je još jedna od metoda koje daju kvaliatativnu ocjenu zavarljivosti.

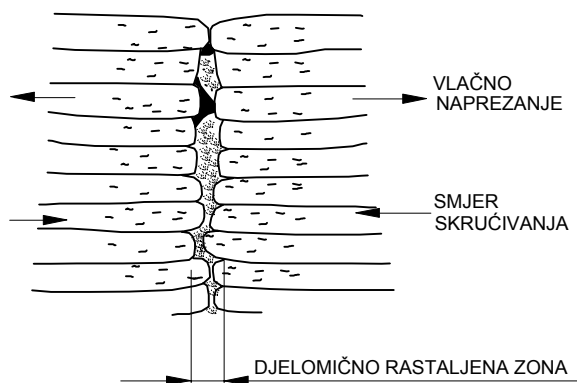


Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno visokim temperaturama (npr. kod čelika od temperature kristalizacije do približno 900 °C), odnosno temperatura skrutnjavanja eventualno prisutnih nečistoća u zavarenom spoju, a koje su u uvjetima naprezanja zbog hlađenja zavarenog spoja osnovni uzročnik nastajanja toplih pukotina. Ove pukotine mogu nastati u zoni utjecaja topline, ali isto tako i u zoni taljenja zavarenog spoja. Za razliku od hladnih pukotina gdje je prijelomna površina svjetlija, kod toplih pukotina prijelomna površina je tamna (zbog oksidacije površine pukotine na visokim temperaturama).

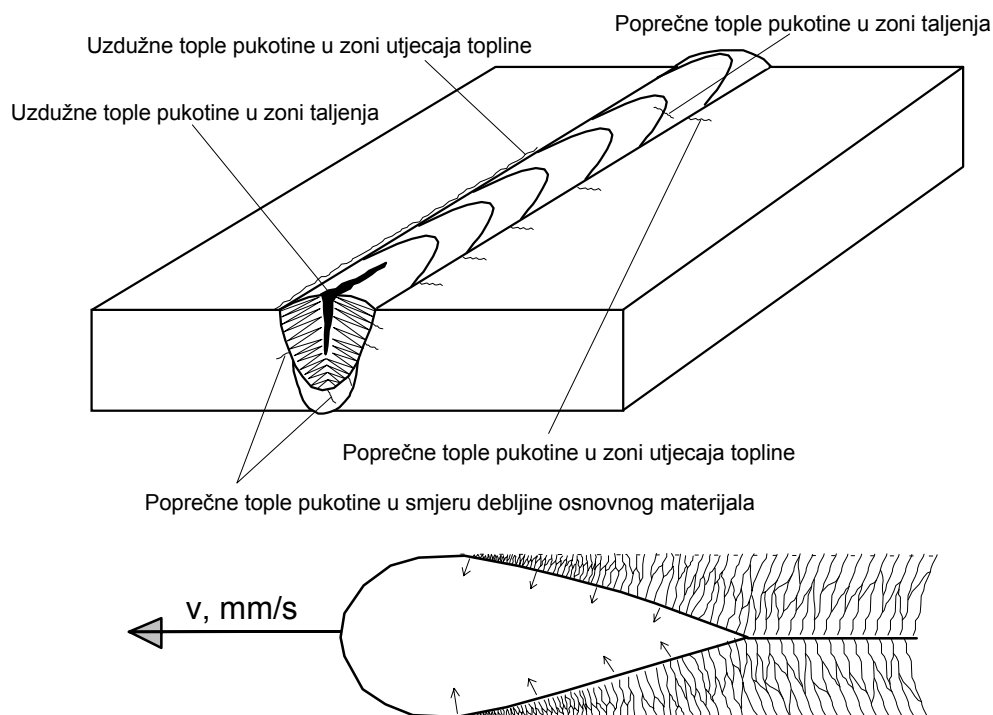
Postoje dvija osnovna tipa toplih pukotina:

1. **kristalizacijske i**
2. **podsolidusne ili likvacijske.**

Kristalizacijske tople pukotine nastaju pri kristalizaciji u zoni taljenja. Pri hlađenju rastaljenog materijala u žlijebu zavara dolazi prvo do kristalizacije metala zavara, a eventualne nečistoće ostaju zarobljene između kristala – dendrita u gornjoj zoni zavara. Djelovanjem naprezanja uslijed skupljanja zavara dolazi do nastajanja tople pukotine u zoni zavara, u gornjoj zoni zavara, na mjestu gdje su koncentrirane nečistoće.



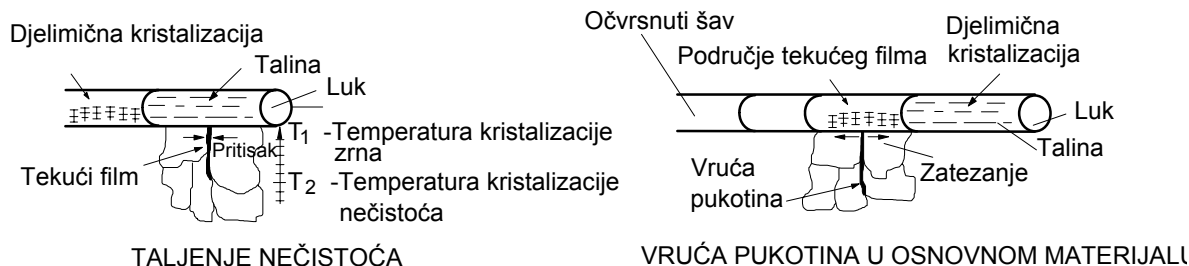
Shematski prikaz nastajanja kristalizacijski segregacijskih pukotina



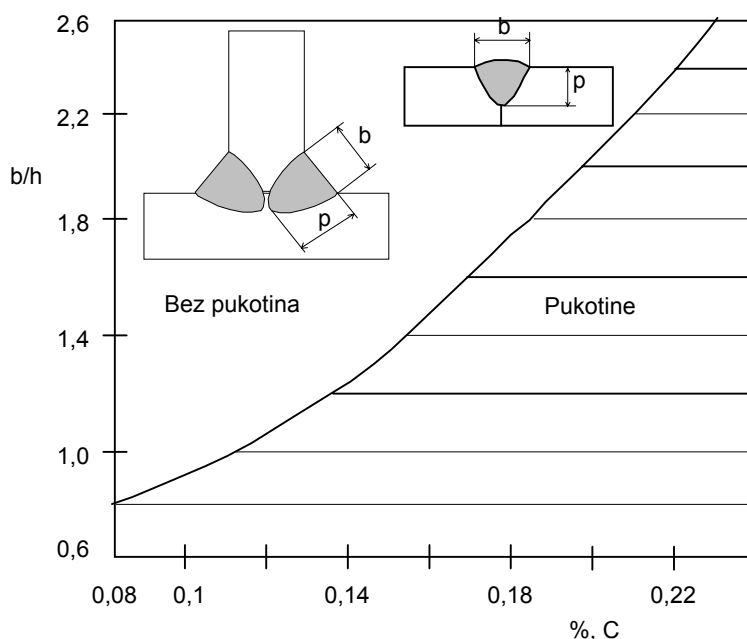
Rast kristala – dendrita u zoni taljenja

Podsoliidusne ili likvacijske pukotine najčešće nastaju u zoni utjecaja topline, poprečno ili okomito na uzdužnu os zavaru, ili u smjeru debljine osnovnog materijala. Posljedica su postojanja strukturnih nehomogenosti – nečistoća koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala u zoni utjecaja topline (poput “tankog sloja filma”). Djelovanjem naprezanja pri hlađenju zavarenog spoja, dolazi do nastajanja toplih pukotina podsoliidusnog ili likvacijskog tipa, na mjestima gdje su prisutne te nečistoće koje zbog utjecaja topline pri zavarivanju djelomično ili potpuno rastaljene. Dakle, u zoni utjecaja topline nije došlo do taljenja osnovnog materijala, ali je došlo do pada čvrstoće po granicama kristalnih zrna zbog omekšavanja ili taljenja “tankih slojeva filma” od nečistoća.

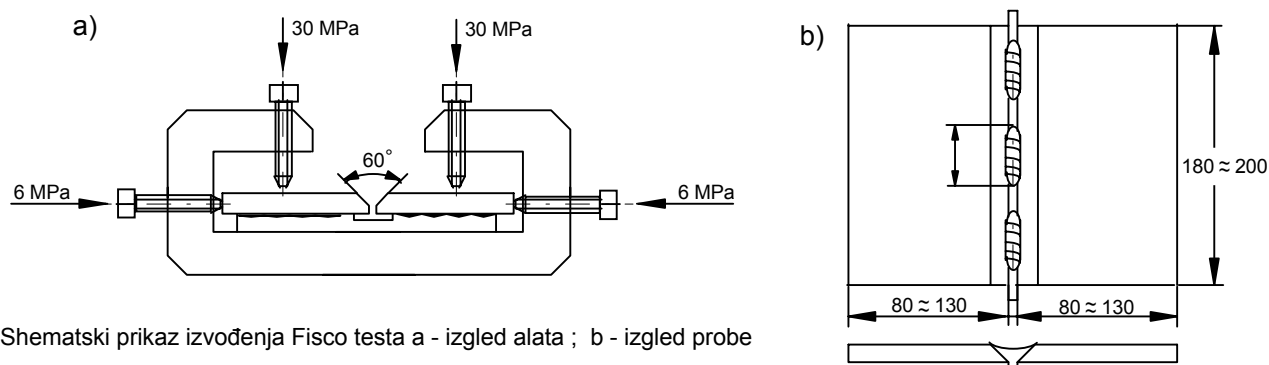
Mehanizam nastajanja likvacijskog tipa pukotine



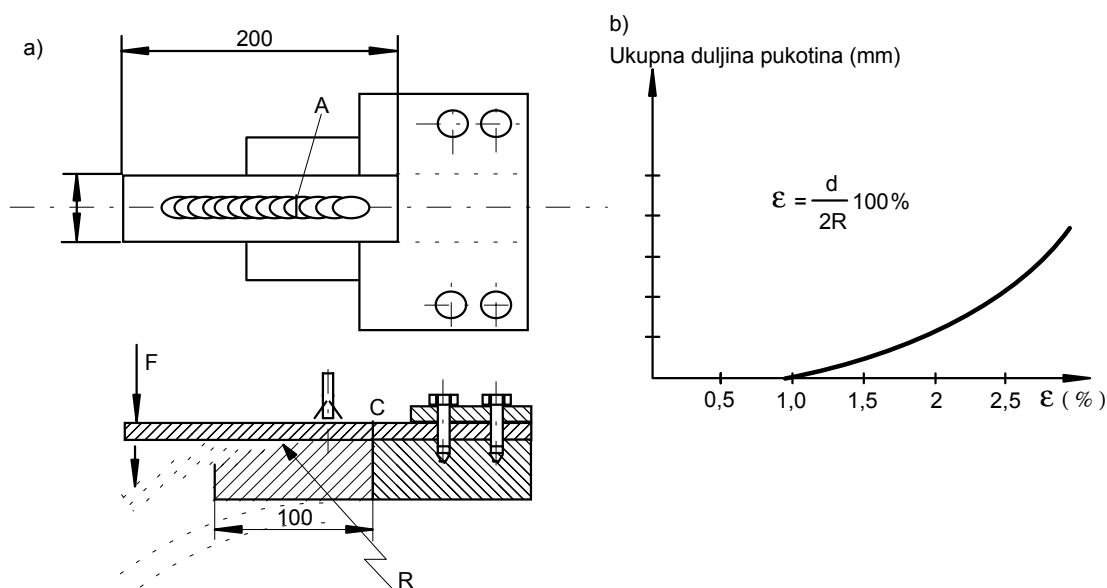
Pojavljivanje toplih pukotina obzirom na odnos penetracije i širina zavaru prema psadržaju ugljika u zavaru.



Fisco metoda za ispitivanje sklonosti toplim pukotinama

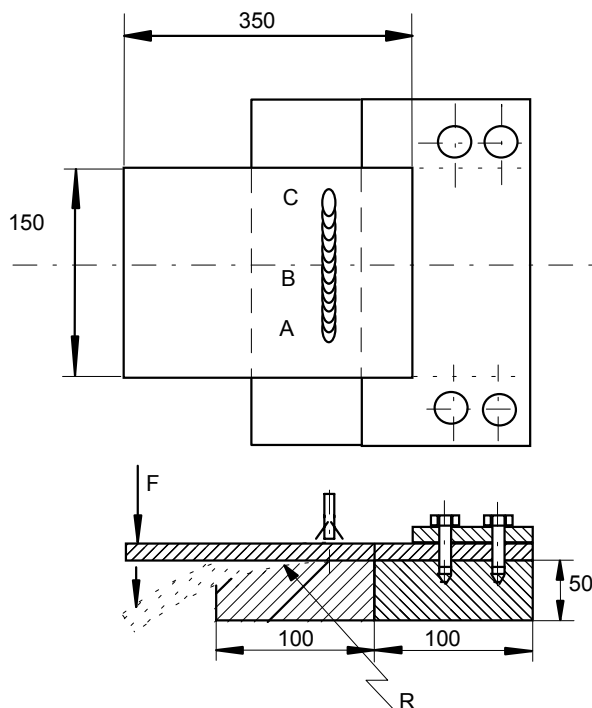


Varestraint metoda za ispitivanje sklonosti prema poprečnim toplim pukotinama



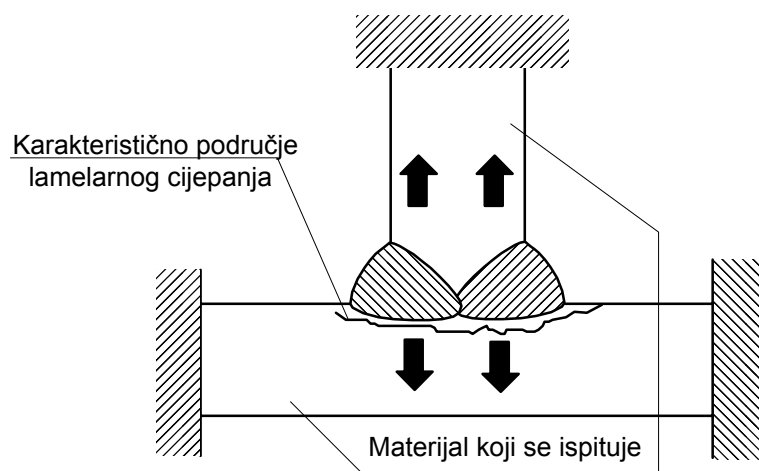
Shema prikaz Vrestraint metode: (a) i grafički prikaz rezultata ispitivanja (b)

Transvarestraint metoda za ispitivanje sklonosti prema uzdužnim toplim pukotinama

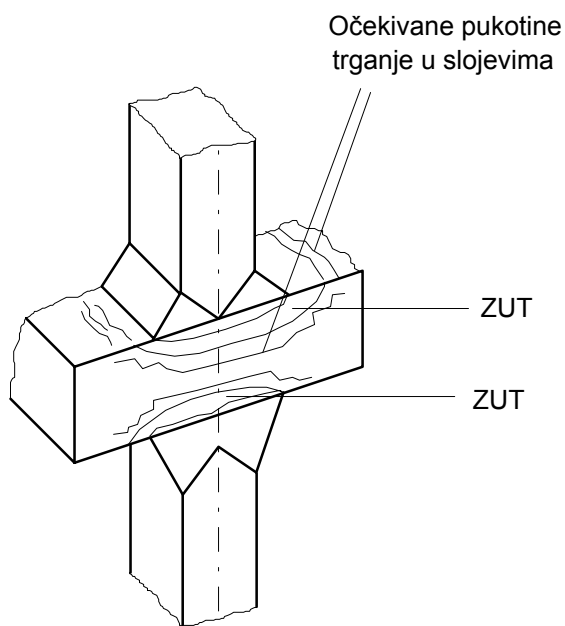


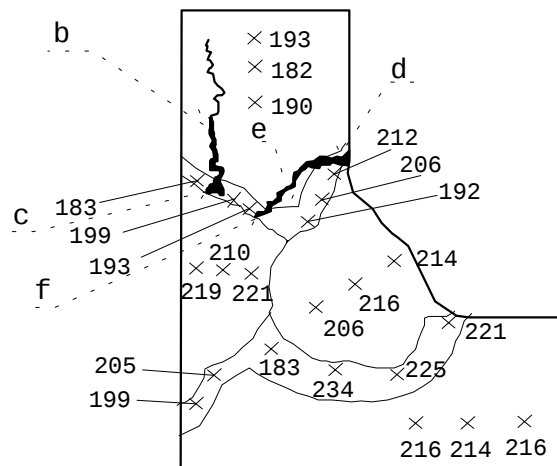
Lamelarno odvajanje ili slojasto trganje nastaje u zoni utjecaja topline i obično se dalje širi na osnovni materijal, a posljedica je postojanja nehomogenosti u osnovnom materijalu i djelovanja naprezanja zbog topline unešene zavarivanjem. Lamelarno odvajanje može nastati i kod debljih, ali isto tako i kod tanjih limova koji imaju strukturne nehomogenosti. Te su nehomogenosti valjanjem dospjele u sredini lima, a kod djelovanja naprezanja (okomito na smjer rasprostiranja nečistoća) uslijed hlađenja i skupljanja zavarenog spoja i materijala u području utjecaja topline, dolazi do slojastog trganja. Ove se pukotine mogu pojaviti kod neumirenih i poluumirenih čelika. Prisutnost nehomogenosti može se pokazati Baumann-ovim testom.

Ako se zna da postoji sklonost osnovnog materijala prema lamelarnom odvajanju i ako ne postoji mogućnost zamjene odgovarajućim materijalom koji nema sklonost prema lamelarnom odvajanju, moguće je uz odgovarajuću tehnologiju zavarivanja, kontrolu i osiguranje kvalitete smanjiti vjerojatnost nastajanja lamelnog odvajanja.



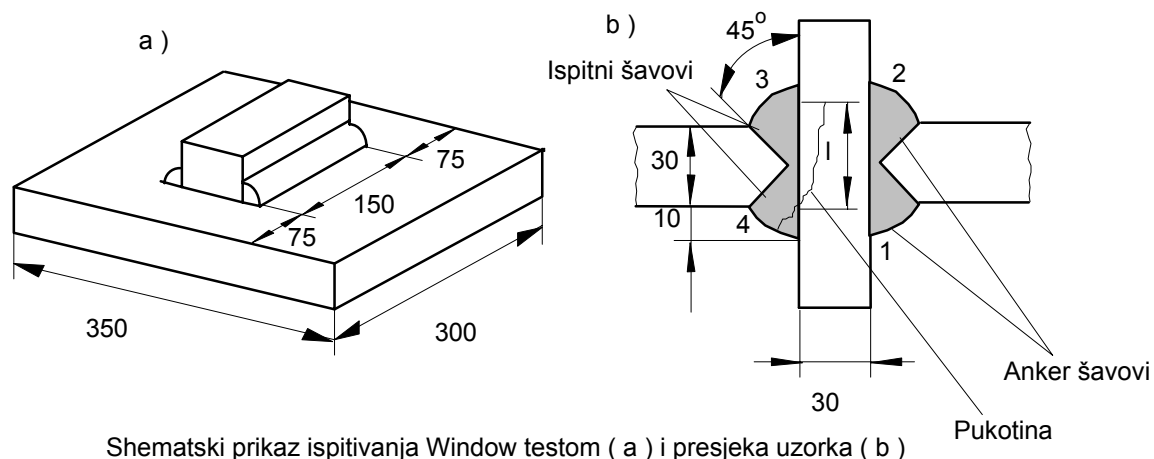
Lokacija lamelarne pukotine u zavarenom spoju





Primjer pukotine nastale pri zavarivanju čelika Č0563, EPP postupkom zavarivanja. Na skici su označene lokacije mjerenja tvrdoće i pripadajuće vrijednosti tvrdoće HV10.

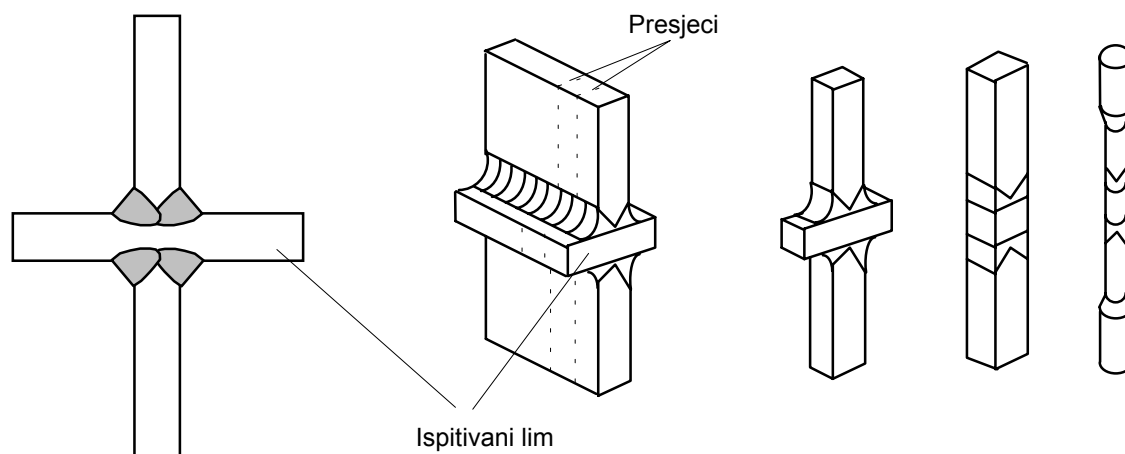
Window metoda – metoda za ispitivanje sklonosti prema lamelarnom odvajanju



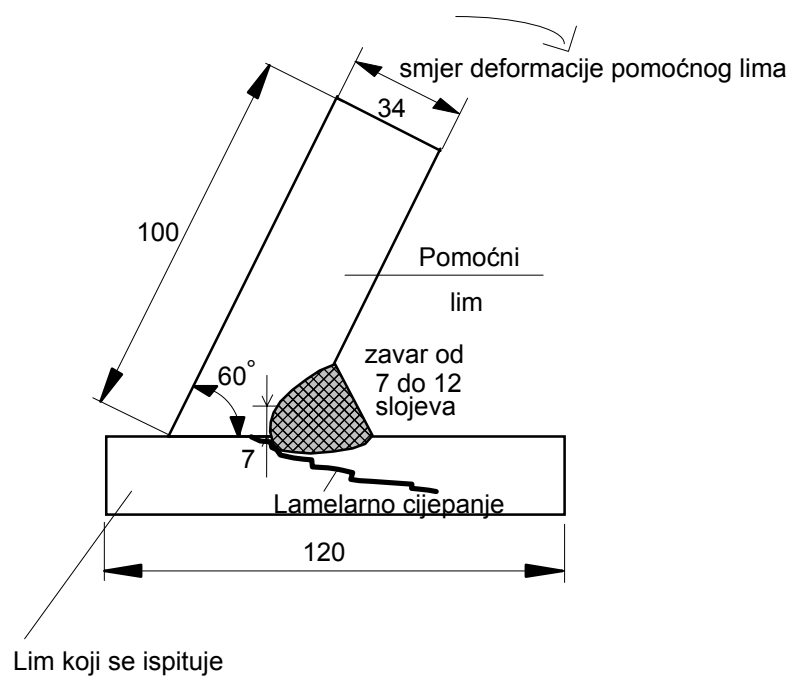
Shematski prikaz ispitivanja Window testom (a) i presjeka uzorka (b)

Det Norske Veritas metoda (preporuke prema IIW)

Kod ove se metode za veće debljine limova izrađuju epruvete za vlačno kidanje iz čistog osnovnog materijala. Za manje debljine limova zavaruju se probne ploče (elektrolučnim postupkom ili elektrootporno), nakon čega se izrađuju epruvete za vlačno kidanje.

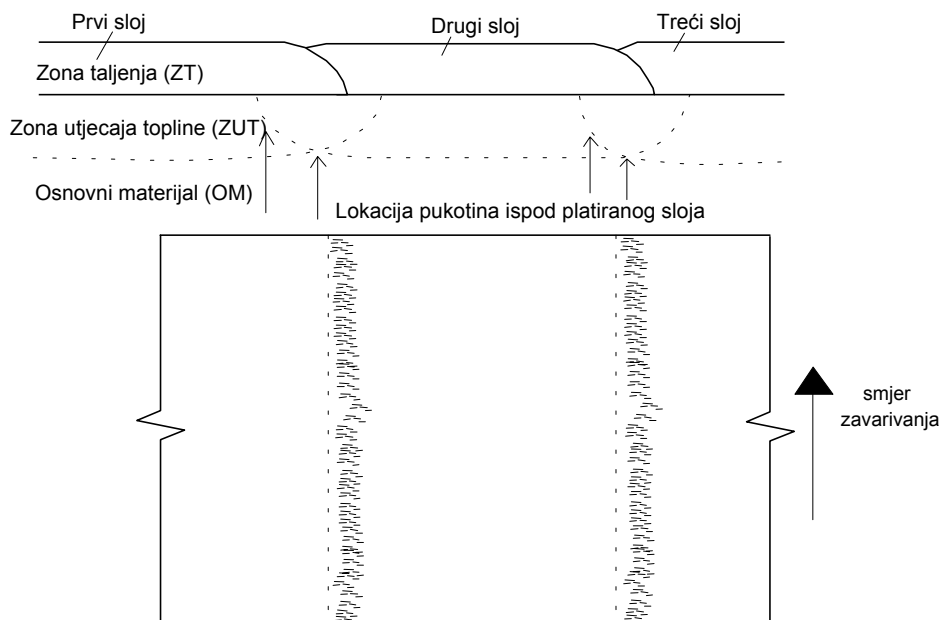


Priprema epruveta prema Det Norske Veritas



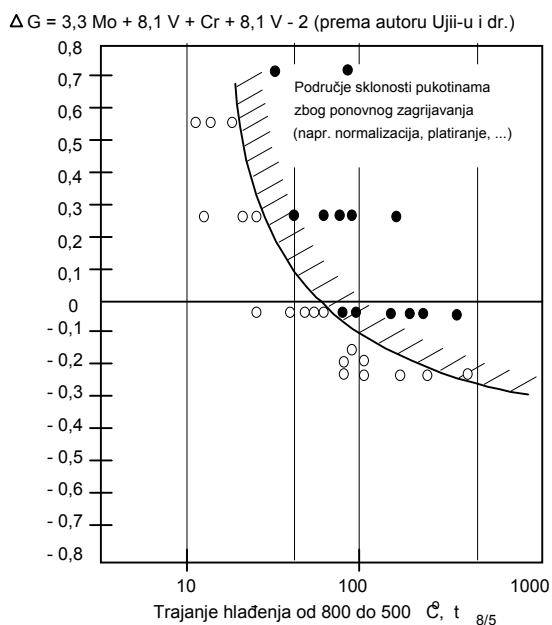
Shematski prikaz ispitivanja Cranfieldovim testom

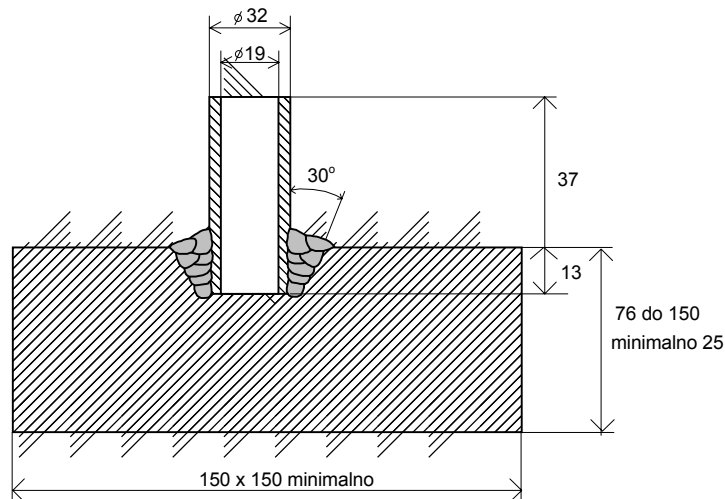
Pukotine zbog naknadnog zagrijavanja ili naknadne toplinske obrade zavarenog spoja najčešće nastaju u tzv. niskotemperaturnom području zbog prevelike brzine zagrijavanja (kada postoji preveliki gradijent temperature u odnosu na površinu i sredinu zavarenog spoja) i pri naglom hlađenju zavarenog spoja (također prevelik gradijent temperature na površini lima u odnosu na sredinu lima). Poseban tip pukotina otkriven je ispod platiranog sloja, pa je po tome dobio i naziv. Ovaj je tip pukotina sasvim slučajno otkriven kod čelika koji su platirani navarivanjem EP postupkom. Izgled tih pukotina prikazan je na sljedećoj slici.



Pukotine ispod platiranog sloja (npr. navarivanje austenitnih čelika EP postupkom, trakom)

Drugim slojem se postiže negativni efekt pregrijavanja u zoni utjecaja prvog navarenog sloja. Tako gruba struktura ima loša mehanička svojstva, što može imati za posljedicu pojavu pukotina ispod platiranog sloja (ima puno utjecajnih čimbenika, između ostalog čelik koji se platira ("crni čelik") ima skoro dvostruko manji koeficijent linearnog istezanja u odnosu na austenitnu plakaturu). Ove se pukotine mogu izbjeći primjenom dvoslojnog platiranja, tako da se prvi sloj navaruje sa manjim toplinskim inputom, a drugi sa većim toplinskim inputom (time se postiže efekt normalizacijskog žarenja zone utjecaja topline prvog sloja).





Ispitivanje sklonosti pukotinama zbog naknadnog zagrijavanja po metodi BWRA

U kružnoj rupi provodi se zavarivanje cijevi prema gornjoj slici. Svakim se zavarivanjem naknadno zagrijava prethodni zavar, a nakon svega se provodi toplinska obrada na temperaturi 600 do 690 °C. Pri tome se koriste različite brzine zagrijavanja i hlađenja proba. Nakon toplinskog tretiranja, uzorak se na odgovarajući način reže, te se metalografski ispituje homogenost zavarenog spoja. Metoda je pogodna za CrMo i CrMoV čelike.

Glavni parametri toplinske obrade zavarenih spojeva koji su uz vrstu i debljinu osnovnog materijala, oblik i dimenzije zavarenog spoja ujedno utjecajni čimbenici kod nastajanja pukotina usljed naknadnog zagrijavanja zavarenog spoja su:

- temperatura progrijavanja (T_s), ovisi o izabranoj toplinskoj obradi;
- vrijeme progrijavanja (t_s), preporučuje se na osnovu izabrane temperature (npr. za popuštanje zaostalih napetosti 2,5 min/mm debljine pri 600 °C);
- brzina zagrijavanja posebno je važna u niskotemperaturnom području radi mogućih pukotina zbog prevelikog temperaturnog gradijenta ($v_h = 5000$ / minimalna debljina u mm, ali mora zadovolji uvjet $50 < v_h < 250$ °C/h);
- brzina hlađenja je bitna kako od temperature toplinske obrade (značajna za toplinsku obradu), tako i u niskotemperaturnom području zbog prevelikog gradijenta temperature jer može doći do pojave pukotina (**u niskotemperaturnom području $v_c = 6500$ / minimalna debljina u mm, ali mora zadovoljen uvjet $50 < v_h < 250$ °C/h).**