

Detektiranje oštećenja u zavarenim spojevima

Lukić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:941984>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-23**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



zir.nsk.hr

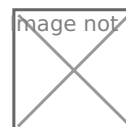


image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Tomislav Lukić

DETEKTIRANJE OŠTEĆENJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Završni rad

Rijeka, kolovoz 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij građevinarstva
Čelične konstrukcije

Tomislav Lukić
JMBAG: 0130322762

Detektiranje oštećenja u zavarenim spojevima

Rijeka, kolovoz 2020.

Naziv studija: **Preddiplomski stručni studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema završnog rada

DETEKTIRANJE OŠTEĆENJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA

DAMAGE DETECTION IN WELDED JOINTS

Kandidat: **TOMISLAV LUKIĆ**

Kolegij: **ČELIČNE KONSTRUKCIJE**

Završni rad broj: **20-ST-13**

Zadatak:

Potrebno je opisati zavarene spojeve, sa svim dijelovima, načinima označavanja, te posebno opisati kutne i sučeone zavare. Napraviti pregled razornih i nerazornih metoda koje se primjenjuju za kontrolu i ispitivanje zavarenih spojeva. Napraviti detaljan pregled nerazornih metoda s opisom svake metode. Poseban osvrt napraviti za vizualnu metodu, metodu uz primjenu penetranta i ultrazvučnu metodu. Za ultrazvučnu metodu je potrebno proučiti rad ultrazvučnog uređaja. U praktičnom dijelu rada, u laboratoriju za konstrukcije je potrebno provesti prethodne metode na četiri primjera zavarenih spojeva. Na kraju je potrebno dati zaključke o provedenim ispitivanjima.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Mentorica:

doc. dr. sc. Paulina Krolo,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Tomislav Lukić

U Rijeci, 24. kolovoza 2020.

IZJAVA

Završni rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić
Šifra projekta RC.2.2.06-0001
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
 Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 24. kolovoza 2020.

Mentor:

ZAHVALA

U prvom redu, veliku zahvalnost dugujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Paulini Krolo dipl. ing. građ. na izdvojenom vremenu i trudu, na strpljenju, pomoći oko literature i vodstvu pri izradi ovog završnog rada.

Također bih se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima koji su uvijek bili na mojoj strani, koji su mi kroz cijelo moje studiranje pomagali kada je to bilo potrebno.

Hvala!

SAŽETAK

U okviru ovog završnog rada dan je pregled razornih i nerazornih metoda ispitivanja zavarenih spojeva te su opisane prednosti i nedostaci za svaku metodu. Ispitivanje zavara u zavarenim spojevima je od velikog značaja zbog toga što postoje razni načini njihova izvođenja te je nužno da zadovoljavaju visoke zahtjeve kvalitete. Zavare nije moguće uvijek izvesti na idealan način pa je zbog toga potrebno provesti ispitivanja. Detaljnije su opisane nerazorne metode ispitivanja zavarenih spojeva te su navedene njihove razlike i mogućnosti njihove primjene. U drugom, praktičnom dijelu završnog rada, opisane su vizualna, penetrantska i ultrazvučna metoda kontroliranja zavara i materijala te su provedena laboratorijska ispitivanja na četiri uzorka primjenom penetrantske kontrole i dva uzorka primjenom ultrazvučne metode. Na kraju su provedene analize provedenih mjerenja te su opisane njihove prednosti i nedostaci.

Ključne riječi: čelik, zavari, nerazorna ispitivanja, penetrantska kontrola, ultrazvučna kontrola

SUMMARY

Within this final paper, an overview of destructive and non-destructive testing methods of welded joints is given, and the advantages and disadvantages for each method are described. Testing of welds in welded joints is of great importance because there are various ways of their execution and it is necessary that they meet high quality requirements. It is not always possible to perform welds in an ideal way, so it is necessary to perform tests. Non-destructive testing methods for welded joints are described in more detail and their differences and possibilities of their application are stated. In the second, practical part of the final paper, the visual, penetrant and ultrasonic methods of welding and material control are described and laboratory tests were performed on four samples using penetrant control and two samples using ultrasound method. Finally, analyzes of the performed measurements were performed and their advantages and disadvantages were described.

Key words: steel, welds, non - destructive testing, penetrant control, ultrasonic control

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O ZAVARENIM SPOJEVIMA.....	3
2.1. Kutni zavari.....	7
2.2. Sučelni zavari.....	9
⁸ 3.1. Metode s razaranjem.....	12
3.2. Nerazorne metode ispitivanja zavarenog spoja.....	13
3.2.1. Vizualna kontrola.....	13
3.2.2. Dimenzionalna kontrola.....	15
3.2.3. Magnetska kontrola.....	17
3.2.4. Kontrola penetrantima.....	19
3.2.5. Ultrazvučna kontrola.....	21
3.2.6. Radiografska metoda.....	24
3.2.7. Akustična kontrola (akustična emisija).....	26
4. PRAKTIČNI RAD.....	27
4.1. Primjeri korišteni na ispitivanju.....	27
4.2. Vizualna kontrola zavarenih spojeva.....	31
4.3. Penetrantska kontrola zavarenih spojeva.....	32
4.2.1. Rezultati ispitanih uzoraka.....	34
4.3. Ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva.....	44
5. ZAKLJUČAK.....	55
Literatura.....	56

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Zavareni spojevi prema ISO 2553</i>	<i>5</i>
---	----------

POPIS SLIKA

Slika 1: Detalj zavara (Izradio autor).....	3
Slika 2: Priprema za sučelni zavar (Izradio autor).....	4
Slika 3: Kutni zavari [3].....	7
Slika 4: Primjeri kutnih zavara [4].....	8
Slika 5: Sučelni zavari [3].....	9
Slika 6: Primjer pripreme sučelnog zavara [5]	10
Slika 7: Proces zavarivanja sučelnog zavara [5].....	10
Slika 8: Vlačno ispitivanje epruvete i ispitivanje udarne žilavosti [7]	12
Slika 9: Uočavanje pukotina vizualnom kontrolom (Izradio autor)	14
Slika 10: Vizualni pregled na kontrakciji [10].....	15
Slika 11: Mjerila za dimenzionalu kontrolu [11].....	16
Slika 12: Indikacija pukotine magnetnim česticama [14].....	17
Slika 13: Shematski princip magnetske kontrole [15]	18
Slika 14: Dvojne elektrode [13].....	18
Slika 15: Shema izvođenja kontrole penetrantima [13].....	19
Slika 16: Primjer otkrivanja pukotina penetrantima [30]	20
Slika 17: Ultrazvučni uređaj Phasor XS [17].....	21
Slika 18: Primjer ultrazvučnog ispitivanja [18]	22
Slika 19: Shematski prikaz ultrazvučne metode [6]	23
Slika 20: Rezultati radiografske metode ispitivanja zavara [19]	25
Slika 21: Rezultati gamagrafske metode ispitivanja zavara [21].....	25
Slika 22: Princip akustične emisije [20]	26
Slika 23: Uzorak A (Izradio autor)	28
Slika 24: Priključak stupa i nosača (Uzorak B) [24].....	29
Slika 25: Ispitivanje priključka nosača i stupa na savijanje [24]	29
Slika 26: Uzorak C (Izradio autor).....	30
Slika 27: Model stupa uzorak D (Izradio autor)	31
Slika 28: Pukotina na zavarenom uzorku B [24]	32
Slika 29: Sredstva za provedbu ispitivanja (čistač, penetrant i razvijlač, s lijeva na desno) (Izradio autor)	32
Slika 30: Nanošenje čistača [28].....	33
Slika 31: Postupak nanošenja crvenog penetranta [28]	33
Slika 32: Primjer nanošenja razvijlača [28]	34
Slika 33: Uzorak A nakon nanošenja penetranta	35
Slika 34: Zavar A4	36
Slika 35: Zavar A3	36
Slika 36: Uzorak B s nanešenim penetrantom (Izradio autor).....	37
Slika 37: Pukotina na zavaru B6 (Izradio autor).....	37
Slika 38: Poroznost kod zavara B1 (Izradio autor)	38
Slika 39: Zavari B3, B4 i B5 (Izradio autor)	39
Slika 40: Velika pukotina na zavaru B2 (Izradio autor)	39
Slika 41: Velika pukotina na zavaru B6 (Izradio autor)	40
Slika 42: Uzorak C (Izradio autor).....	41
Slika 43: Pukotine na zavaru C2 (Izradio autor).....	42

Slika 44: Stup sa razvijanjem (Izradio autor).....	43
Slika 45: Rezultati ispitivanja uzorka D (Izradio autor)	43
Slika 46: Uzorak za ispitivanje ultrazvučnom metodom (Izradio autor).....	44
Slika 47: Ultrazvučni uređaj Phasor XS [29].....	45
Slika 48: Sonde konvencionalnog načina rada [27].....	45
Slika 49: Phased array sonde [25].....	46
Slika 50: Prikaz Phased array načina rada [26]	46
Slika 51: Shematski prikaz ravne sonde [22].....	47
Slika 52: Kalibracijski brok prema ISO 7963 [23]	47
Slika 53: Prikaz preglednika za konvencionalan način rada (Izradio autor)	48
Slika 54: Alarm (Izradio autor).....	50
Slika 55: Blenda siječe prva 2 signala (Izradio autor)	51
Slika 56: Blenda siječe prvi signala (Izradio autor).....	51
Slika 57: Alternativan prikaz grafa (Izradio autor).....	52
Slika 58: Rezultati na koje se odnosi kalibracija (Izradio autor)	52
Slika 59: Debljina uzorka dobivena ispitivanjem i blenda A (Izradio autor)	53

1. UVOD

Ispitivanje spojeva, bilo zavarenih ili vijčanih, od samih je početaka gradnje bio bitan faktor u procesu gradnje. Na spajanju konstrukcijskih elemenata se zasniva i sam princip gradnje. Prema tome su se razvila sve složenija ispitivanja svih elemenata građevine, tako i zavaranih spojeva. Današnji način gradnje je puno složeniji, detaljniji te napredniji nego nekada, pri čemu su se razvile suvremene metode i načini ispitivanja.

Kako se gradnja sve više razvija, tako se razvijaju i metode ispitivanja. Od velikih kompliciranih uređaja s kojima je bilo teško manevrirati po gradilištu, razvijeni su manji kompaktni uređaji, kojima se relativno brzo mogu uočiti različite vrste nepravilnosti.

Dugo vremena su jedine metode za provjeru zavarenih spojeva bile razorne metode kojima su se uništavali ispitni uzorci. Taj problem je doveo do izuma uređaja i razvoja metoda koje mogu ispitati uzorak bez da ga zauvijek učine beskorisnim. Takve metode ispitivanja se nazivaju nerazorne metode.

Kako su se razorne metode mogle primjenjivati samo na ispitnim uzorcima, nitko nije mogao jamčiti da su izvedeni spojevi za vrijeme gradnje istih karakteristika. Razvojem nerazornih metoda povećala se kvalitetnija izvedba i trajnost takvih spojeva jer je omogućena konstantna kontrola svih izvedenih spojeva.

Kvalitetna izvedba, ne samo zavarenih spojeva već i ostalih spojeva na konstrukciji je najvažnija karakteristika koja se u današnje vrijeme uzima u obzir, a direktno je povezana s prisutnošću grešaka, nedostataka koji su nastali prilikom izvođenja radova. Takve je greške potrebno spriječiti ili svesti na najmanju moguću mjeru.

Osim kvalitete izvedbe, treba uzeti u obzir da zavareni spoj može, s obzirom na veličinu greške, postati najslabija karika sustava što može dovesti do katastrofalnih posljedica od urušavanja konstrukcije do gubitaka života.

Ispitivanjima se relativno lako i brzo mogu utvrditi karakteristike zavarenih spojeva. Te informacije nam mogu u budućim projektima biti od velike koristi, kako izvođačima za preciznije izvođenje radova, tako i za investitore kojima je prvotna želja visoka kvaliteta uz što manje troškove gradnje. Utvrđivanjem karakteristika zavarenih spojeva, moguće je preciznije odrediti utrošak materijala potrebnog za te spojeve, čime se može, ako se radi o velikom broju spojeva, znatno uštedjeti na troškovima materijala i izvođenju radova.

Kako bi se greške spriječile i otklonile u potpunosti, potrebno je provesti kontrolu i vršiti

ispitivanja u nekoliko faza, neposredno prije, za vrijeme i nakon izvođenja zavara.

Tema završnog rada je detektiranje pukotina u zavarenim spojevima. U prvom djelu rada predstavljene su razorne i nerazorne metode kakve se primjenjuju za ispitivanje zavarenih spojeva. Navedene su njihove prednosti i mane te uvjeti u kojima se koriste. U drugom dijelu prikazan je praktični dio u kojemu su provedena laboratorijska ispitivanja na primjerima nekoliko zavarenih spojeva. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Za ispitivanje su provedene tri nerazorne metode. Metoda ispitivanja zavara penetrantima, vizualna kontrola te ultrazvučna metoda.

2. OPĆENITO O ZAVARENIM SPOJEVIMA

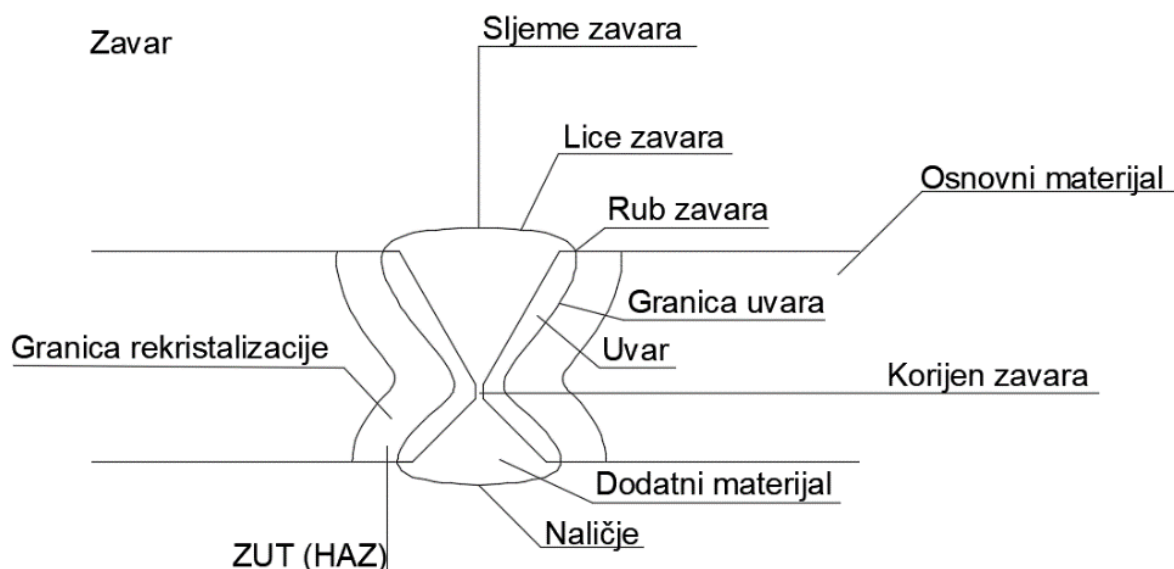
Postupkom zavarivanja se u području zavarenog spoja sjedinjuje osnovni materijali, eventualno i dodatni materijali u jednu strukturalno homogenu cjelinu. Prilikom spajanja se zavarivanjem griju osnovni elementi u području spoja na dovoljno visoku temperaturu čime se formira zajednički fluid koji hlađenjem postaje trajno spojen zajednički element [1].

Osnovna svojstva zavarenog spoja su [1]:

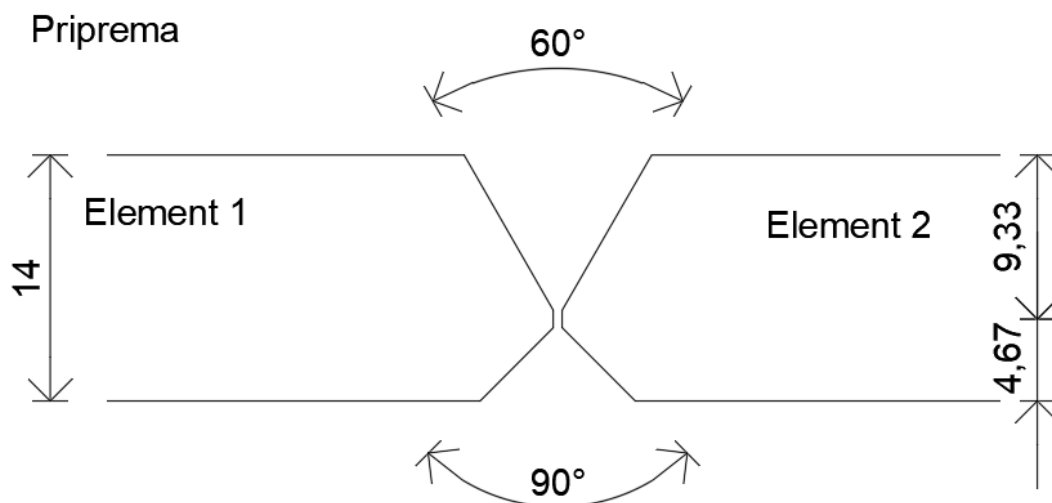
1. nerastavljiv (ne mogu se rastaviti bez razaranja zavara),
2. nepomičan (spojeni elementi ne mogu se zasebno pomicati),
3. neposredan (spajaju se materijali od kojih su elementi izrađeni),
4. tehnološko toplinski (uz dovođenje/odvođenje topline odvija se proces taljenja/skrucivanja) i mehanički u slučaju zavarivanja pritiskom.

Zavareni spojevi u građevinarstvu pogodni su za [1]:

- prijenos mehaničkih opterećenja (sile i momenti kod zavarenih konstrukcija),
- izvedbu vodonepropusnih spojeva,
- izvedba polumontažnih dijelova konstrukcija (hale),
- izvedbu rešetkastih konstrukcija,
- izvedbe metalnih stubišta i dr.



Slika 1: Detalj zavara (Izradio autor)



Slika 2: Priprema za sučelni zavar (Izradio autor)





















Zavarivanjem se većinom spajaju metalni materijali poput čelika, bakra ili aluminija, međutim spajaju se i nemetalni materijali poput polipropilena ili polietilena. Elementi se spajaju taljenjem ili samo omekšavanjem osnovnog materijala, uz ili bez korištenja dodatnog materijala ili dodatnog pritiska. Detaljno prikazani dijelovi zavara prikazani na slikama 1 i 2. Prilikom rada sa zavarenim slojevima treba imati na umu da svaki zavareni spoj može biti najslabije mjesto sustava. Prilikom izvođenja zavara su česte manje ili veće greške, a otkazivanje nekih zavarenih spojeva može imati katastrofalne posljedice [1].


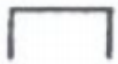








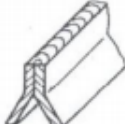









Zavareni spojevi se prema obliku mogu podijeliti u dvije osnovne skupine:

1. Kutni zvari (zvari u uvali),
2. Sučelni zvari

Postoje različite vrste zavarenih spojeva i nekoliko klasifikacija. U tablici 1 su prikazane podjele i oznake zavarenih spojeva prema normi ISO 2553. Oznake su osmišljene kao pojednostavljeni prikaz vrste zavarenog spoja i većinom su slične izgledu zavara. Oznake nisu povezane sa načinom izvedbe zavarenog spoja [2].

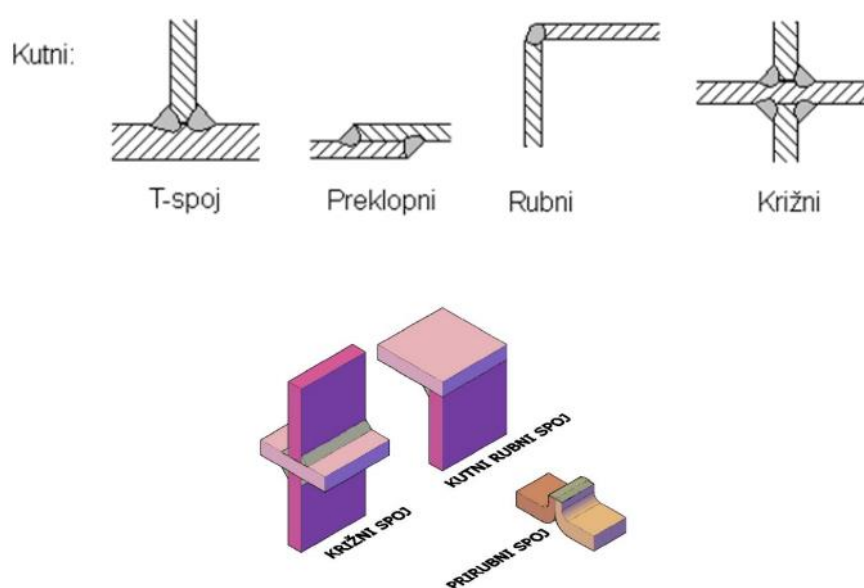
Tablica 1: Zavareni spojevi prema ISO 2553 [2]

Br.	Naziv	Izgled	Oznaka
1	Rubni zavar između limova s potpunim taljenjem povijenih stranica		
2	Jednostrani "I" zavar		
3	Jednostrani "V" zavar		
4	Jednostrani "V" zavar (s jednom zakošenom stranicom)		
5	Jednostrani "Y" zavar		
6	Jednostrani "Y" zavar (s jednom zakošenom stranicom)		
7	Jednostrani "U" zavar (s paralelnim ili kosim stranicama)		
8	Jednostrani "J" zavar		
9	Korijeni zavar		
10	Kutni zavar		

11	Zavar u otvoru		
12	Točkasti zavar		
13	Linijski zavar		
14	Jednostrani "V" zavar (sa strmim stranicama)		
15	Jednostrani "V" zavar (sa jednom strmo zakošenom stranicom)		
16	Rubni zavar		
17	Navar		
18	Površinski spoj		
19	Nagnuti spoj		
20	Presavijeni spoj		

2.1. Kutni zavari

Kutni zavar izvodi se sa jedne strane ili dvije te je pogodan za zavarivanje debljih elemenata koji su pristupačni sa svih strana. Izvođenje kutnog zavara ne zahtijeva prethodnu pripremu limova, ali je moguće izvođenje sa skošenjem jedne ili obje strane. Kutni zavari prilikom kojih se izvodi skošenje s jedne strane izvodi se kod zavara debljine do 12 mm. Kada se zavarivanje izvodi samo s jedne strane, skošenja s obje strane se izvode kod zavara debljine do 40 mm. Vrste kutnih zavara slika 3.



Slika 3: Kutni zavari [3]

Križni zavar ima sve elemente zajedničke s jednostavnim kutnim zavarom. Prepoznaje se po tome što ima jedan kontinuirani element, a drugi se prekida i nastavlja s druge strane zavara. Križni zavar se u građevinarstvu često koristi prilikom jednostavnih spojeva poput postolja stupa i stupa, te kod spajanja cijevi koje podnose veća opterećenja.

Spojevi kod kojih se preklapaju rubovi su jednostavni i ne zahtijevaju precizno podešavanje dijelova koji se spajaju. Spoj zavaren s obje strane može podnijeti znatno veća opterećenja i pogodniji je za metalne konstrukcije većih dimenzija.

Prirubni spojevi su pogodni za spajanje tankih limova, najviše do 4 mm debljine. Takvi spojevi se mogu koristiti prilikom spajanja nekih vrsta limenih pokrova, prilikom spajanja limenih obloga zidova koji nisu pod velikim opterećenjem.



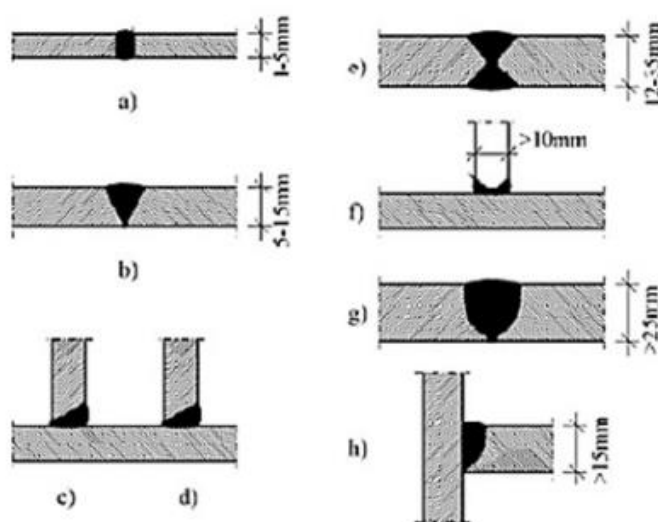
Slika 4: Primjeri kutnih zavara [4]

Prednost kutnih spojeva je prvenstveno u cijeni izvedbe takvih spojeva u odnosu na sučelne zavare i u jednostavnosti izvedbe jer nije potrebna prethodna priprema limova. Primjeri kutnih zavara slika 4.

Kada govorimo o nedostacima takvih zavara, javlja se problem s izgledom takvih spojeva, te iz tog razloga takve spojeve koristimo na mjestima koja nisu vidljiva. Osim toga, imaju slabu otpornost prilikom zamora na što se prilikom proračuna i odabira zamora za zadanu konstrukciju treba obratiti dodatna pozornost na opterećenja kojima su izloženi [3].

2.2. Sučelni zavari

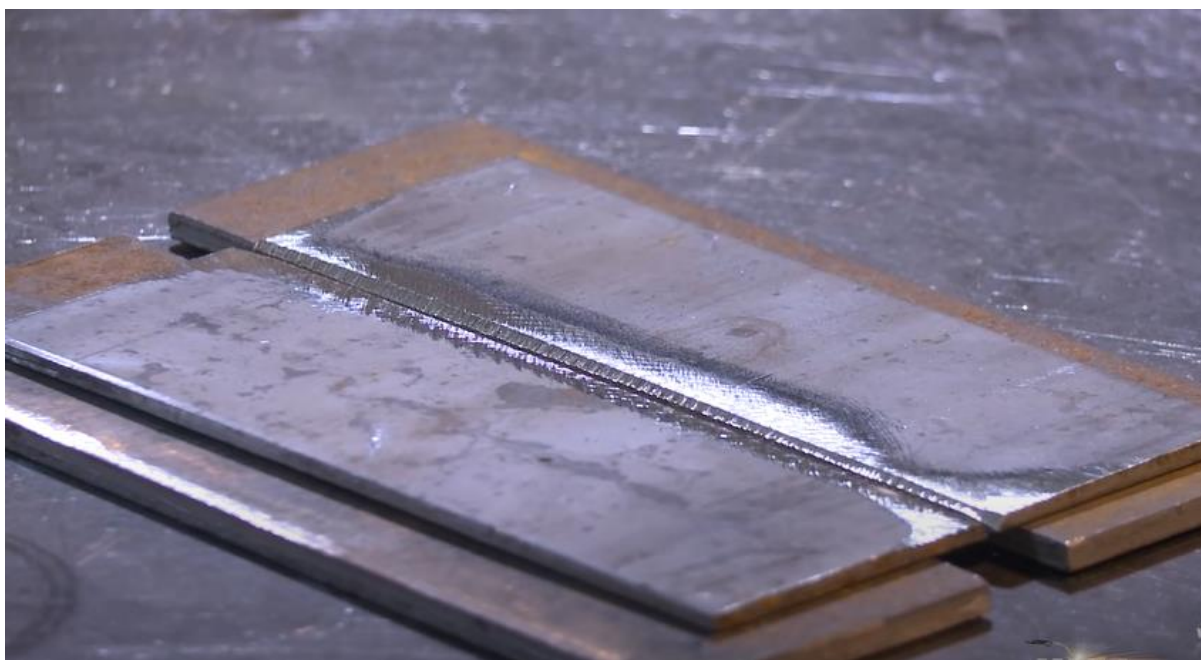
Sučelni spoj se izvodi zavarivanjem dvaju elemenata čiji se rubovi dodiruju i međusobno zatvaraju kut koji najčešće iznosi 180 stupnjeva. Debljina sučelnog spoja je određena debljinom osnovnog materijala. Kako bi se omogućilo kvalitetno i efikasno spajanje elemenata, potrebno je velikom pažnjom pripremiti rubove spoja. Dobrom pripremom se smanjuju deformacije i naprezanja u spojevima. Zavarivanje se može izvoditi s jedne strane ili sa obje strane. Takve je zavare moguće lako i sa velikim brojem metoda ispitati. Vrste kutnih zavara slika 5.



Slika 5: Sučelni zavari [3]

Neke od prednosti koje se javljaju kod sučelnih zavara u odnosu na kutne zavare su dobro ponašanje prilikom zamora te dobar estetski izgled. Kako bi dobili traženu kvalitetu zavarenog spoja, potrebno je izvršiti pripremu limova prije zavarivanja što uzima dodatno vrijeme i povećava troškove zavarivanja [3].

Primjer pripreme i izvođenje kutnog zavara prikazani su na slikama 5 i 6.



Slika 6: Primjer pripreme sučelnog zavora [5]



Slika 7: Proces zavarivanja sučelnog zavora [5]

3. POSTUPCI KONTROLE I ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA

Kontrole zavarenih spojeva su nužni poslovi u svim fazama, prije, za vrijeme i nakon izvedbe zavarenog spoja. Osnovna zadaća im je da osiguraju sve potrebne uvjete za pravilno izvođenje zavarenih spojeva, a ne otkrivanje i ispravljanje grešaka nakon što su spojevi već izvedeni. U svim segmentima gradnje, gdje se vodi računa o kakvoći zavarivanja, kao njegov osnovni segment treba biti ugrađen postupak kontrole zavara u njegovom kompletnom procesu nastajanja zbog toga što zavareni spojevi moraju kao spojeni elementi osiguravati dovoljnu razinu sigurnosti [6].

Postoje tri faze prilikom kojih treba obratiti određenu pozornost na kvalitetu izvedbe zavara:

- prije početka zavarivanja
- tijekom izvođenja zavarivanja
- nakon završenog zavarivanja

Sve kontrole je potrebno izvesti kontrolirano, organizirano i prema pravilniku za izvođenje ispitivanja.

Kod kontrola prije zavarivanja potrebno je obratiti naročitu pozornost jer su u većem dijelu bili znatno zanemareni. Prilikom takvih kontrola obraća se pozornost na osnovni i dodatni materijal, njihovo stanje, vidljive nepravilnosti i sl.. Također, potrebno je obratiti pozornost na tehnološki redoslijed zavarivanja, postupak zavarivanja, sam način zavarivanja, na zavarivače, strojeve i uređaje, izvođenja i temperature zavarivanja i dr. [6].

Kontrole tijekom zavarivanja ovise ponajviše o savjesnom izvršavanju jer će o njima u najvećem dijelu ovisiti kvaliteta izvedenog zavara. Zbog takvog rada, međufazna nerazorna kontrola mora biti samo nužna potvrda da je zavarivanje izvršeno besprijeorno. Preskakanje i izostavljanje postupka kontrole zavara, može se vratiti na najneugodniji način, u obliku pogreške u zavarenom spoju. Kontrole koje se izvršavaju su: kontrola pripajanja, kontrola postupka zavarivanja, kontrola redoslijeda parametara i ostalih uvjeta zavarivanja te kontrola zavarivanja posebnih detalja [6].

Kontrole koje se obavljaju nakon zavarivanja, ako su pravilno provedeni radovi iz prethodnih faza, služe samo kao dokazivanje kvalitete izvedenih zavara. Tada se vrše sljedeće kontrole: vizualne, površinske obrade zavarenog spoja, nerazorna kontrola, mjerenje ukupne deformacije uzoraka razaranjem itd.

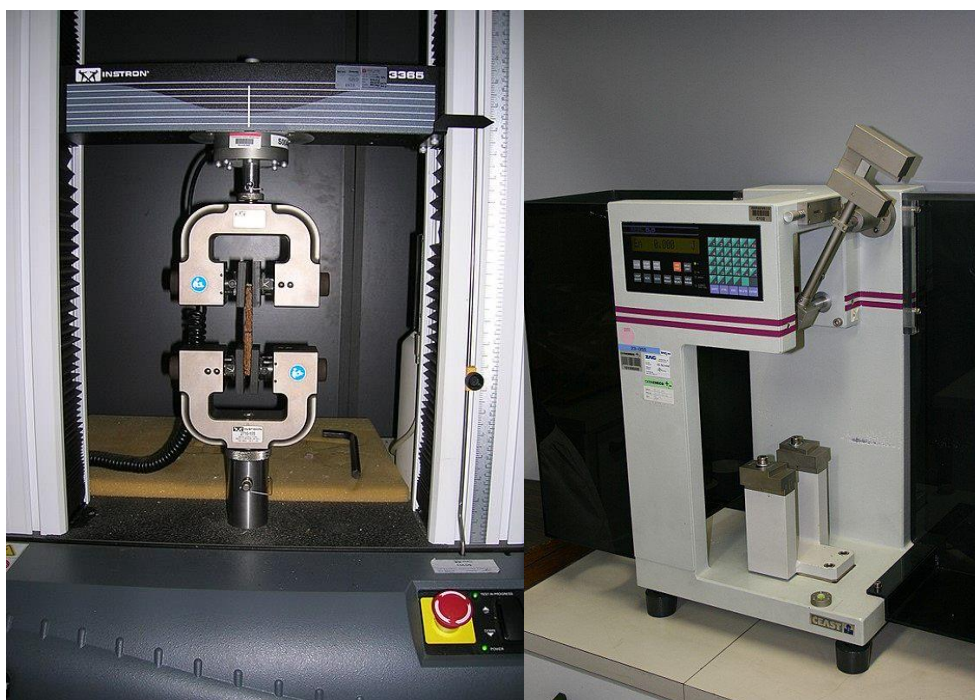
Kontrola kvalitete nakon zavarivanja može se podijeliti na kontrolu kvalitete metodama bez razaranja i kontrolu kvalitete metodama sa razaranjem [6].

3.1. Metode s razaranjem

Metode s razaranjem, kao što im ime govori, ostavljaju uzorak nakon ispitivanja razorenim te se samim time ne mogu koristiti na već ugrađenim spojevima jer bi se zbog toga morali mijenjati uzorci uzeti sa konstrukcije. Takve metode se koriste kod ispitivanja tvrdoće, kemijskog sastava i strukture zavarenih spojeva. Provjere mehaničkih i antikorozivnih svojstava imaju za cilj osigurati potrebna svojstva zavarenih spojeva [6].

Osnovne metode s razaranjem su [6] :

- vlačno ispitivanje epruvete (najčešće se traže radni dijagram čelika, vlačna čvrstoća, lomna čvrstoća, kontrakcija i izduženje, ali se mogu tražiti i neka druga svojstva) prikazano slikom 8,
- mjerenja tvrdoće,
- ispitivanje udarne žilavosti prikazano slikom 8,
- različita korozijska ispitivanja,
- različita dinamička ispitivanja,
- tlačne probe sa razaranjem,
- različite radioničke probe i probe zavarljivosti,
- ispitivanja sadržaja kemijskih elemenata (kemijska metoda na temelju strugotine metala),
- tlačna proba sa razaranjem i dr.



Slika 8: Vlačno ispitivanje epruvete i ispitivanje udarne žilavosti [7]

3.2. Nerazorne metode ispitivanja zavarenog spoja

Nerazorne metode za ispitivanje zavarenih spojeva imaju višestruke prednosti u odnosu na metode s razaranjem. Neke od tih prednosti su: mogućnost ispitivanja na istom uzorku ili na istom mjestu konstrukcije različitim metodama, ispitivanje više puta tijekom njegovog uporabnog vijeka, ispitivanje na više mjernih mjesta te više mjernih uzoraka. Jedini nedostatak nerazornih metoda jest u tome što je za interpretaciju dobivenih rezultata ispitivanja potrebno iskustvo, te je potrebno stručno i iskusno osoblje [8].

Nerazorna ispitivanja u građevinarstvu se koriste već desetljećima, metode se konstantno razvijaju i usavršavaju, isto kao i tehnologija ispitivanja. Neka od suvremenijih ispitivanja trajnosnih svojstava materijala razvijena su u posljednjih 20 do 30 godina.

Osnovne metode bez razaranja su:

- vizualna kontrola,
- dimenzionalna kontrola,
- penetrantska kontrola,
- magnetska kontrola,
- ultrazvučna kontrola,
- radiografska kontrola,
- akustička emisija,
- kontrola nepropusnosti i
- ostale metode.

3.2.1. Vizualna kontrola

Prije korištenja bilo koje druge metode kontrole zavara, ali ne samo zavara već i svih drugih spojeva i materijala koji se kontroliraju, primjenjuje se vizualna kontrola. Takva kontrola je relativno jeftina, potrebno je samo poznavati princip zavarivanja i njegove karakteristike. Provođenje vizualne kontrole oduzima jako malo vremena, a može dati vrlo korisne informacije kako o kvaliteti zavarenih spojeva, izvođenju zavara, tako i o potrebi provođenja kontrole nekom drugom metodom [9].



Slika 9: Uočavanje pukotina vizualnom kontrolom (Izradio autor)

Vizualnom metodom se mogu otkriti razne površinske pogreške poput većih pukotina, nezavarenog korijena, površinske poroznosti, te nepravilnosti oblika lica i korijena zavora. Vizualna kontrola je jedina od svih metoda koja može uočiti, predvidjeti uzrok i mjesto nastajanja pogreške, radi čega vizualnoj kontroli treba pridati prvenstveno značenje među svim nerazornim i razornim metodama. Primjer uočavanja pukotina vizualnom kontrolom je prikazan slikama 9 i 10. Prilikom vizualne kontrole, bilo bi poželjno da je površina očišćena i da je svijetlo dovoljno jako. Veće nepravilnosti mogu se uočiti i u lošijim radnim uvjetima osvjetljenja.

Za pomoć prilikom vizualne kontrole u skućenim dijelovima konstrukcije koriste se različita povećala i lokalna osvjetljenja [6].



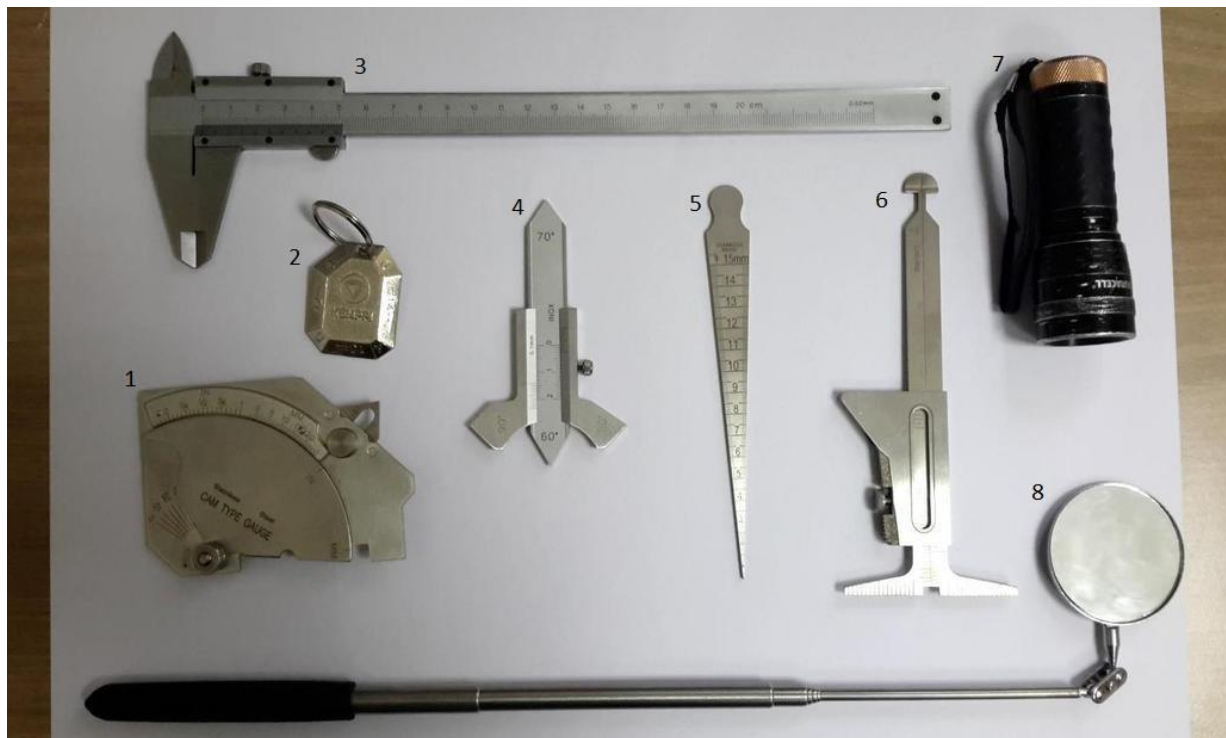
Slika 10: Vizualni pregled na kontrakciji [10]

3.2.2. Dimenzionalna kontrola

Kao što joj ime govori, kod dimenzionalne kontrole se provjeravaju dimenzije kako bi se utvrdilo da su na svim mjestima jednake debljine zavara i materijala, kako nije iskorištena prevelika ili premala količina materijala te da su svi zavari izvedeni na pravilan način.

Za mjerenje dimenzija koriste se različiti uređaji, neki od njih su digitalni, neki analogni, a od nekih postoje verzije i digitalnih i analognih.

Uređaji i alati koji se koriste prilikom dimenzionalne kontrole također se mogu upotrebljavati prilikom vizualne kontrole.



Slika 11: Mjerila za dimenzionalu kontrolu [11]

Mjerila i pribor koji se koristi kod dimenzionalne, ali i vizualne kontrole (slika 11):

- 1. Višenamjensko mjerilo zavora pomoću kojeg se mjeri nadvišenje sučelnog zavora i debljina kutnog zavora, a također se može mjeriti duljina katete zavora, dubina žlijebova, izmaknutost dvaju limova
- 2. Mjerilo za kutni zavar služi za brzo i jednostavno mjerenje debljine kutnih zavora
- 3. Pomično mjerilo (pomična mjerka) koja se koristi za mjerenje debljine lima
- 4. Mjerilo s nonijusom-služi za mjerenje nadvišenja sučelnog zavora i debljinu kutnog zavora, ima još funkciju provjere kuta pripreme žlijeba za sučelni zavar
- 5. Mjerilo za mjerenje zazora pomoću kojeg se mjeri razmak između limova kod pripreme sučelnog zavarenog spoja
- 6. Mjerilo za mjerenje smicanja koje služi za provjeru pomaknutosti dvaju limova ili cijevi u sučelnom spoju prije zavarivanja
- 7. Baterijska svjetiljka koja se koristi kod preslabog osvjetljenja kontroliranog zavora
- 8. Teleskopsko zrcalo koje služi za vizualni pregled teže dostupnih zavora [11].

3.2.3. Magnetska kontrola

Magnetska metoda kontrole zavara koristi se za otkrivanje površinskih i podpovršinskih grešaka, približno do dubine od 6 mm kod feromagnetnih materijala. Princip se zasniva na magnetskoj indukciji [6] (Slika 13 i 14).

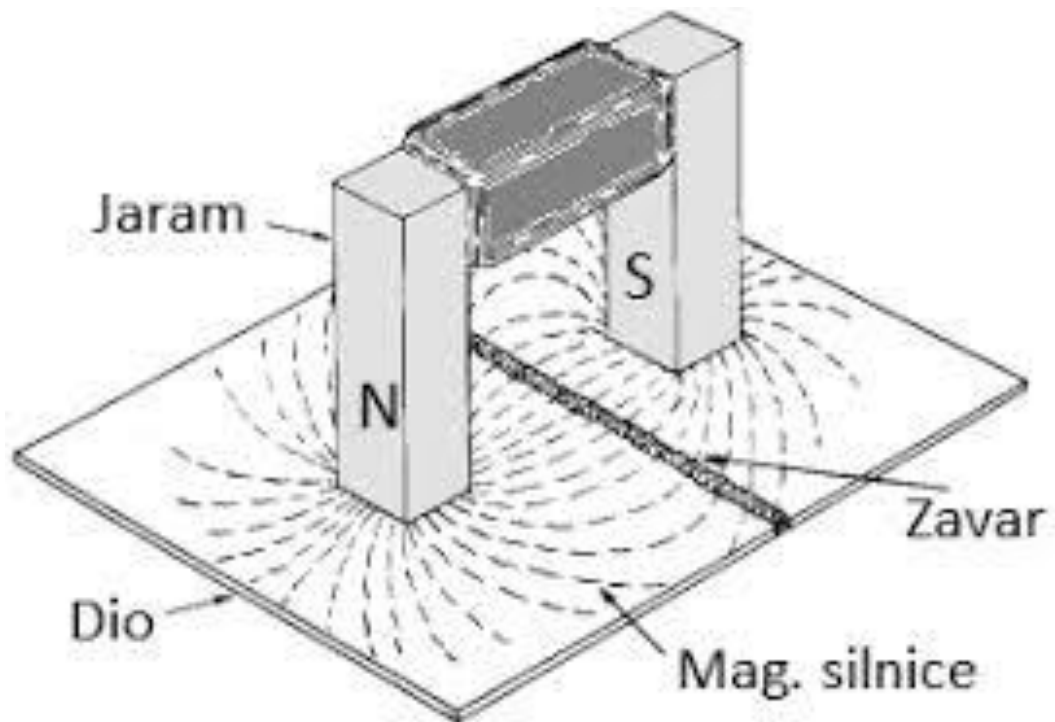
Ova metoda je u današnje vrijeme u širokoj primjeni radi niske cijene i relativno jednostavnog postupka ispitivanja. Metoda je pouzdana kod otkrivanja grešaka poput pukotina i zareza naročito onih blizu površine pregleda [12] (Slika 12).

Problem koji se javlja kod ove metode je usko područje primjene s obzirom da se postupak može koristiti samo kod feromagnetnih materijala. Materijali koje je moguće ispitati su feromagnetsko željezo, kobalt, nikal i dr. Ova metoda zasniva se na principu magnetske indukcije. Greške otkrivamo na način da se zbog poremećaja u gustoći magnetskog toka, magnetske čestice nakupljaju na mjestu greške i time je čine vidljivom ispod UV svjetla. Postoje dvije magnetizacije ispitnog predmeta. Prva je strojem za magnetizaciju, druga je lokalna, s pomoću ručnog jarma ili kontaktnih elektroda. Odabir tehnike ovisi o geometriji ispitnog elementa i o vrsti greške koju je potrebno otkriti [9].

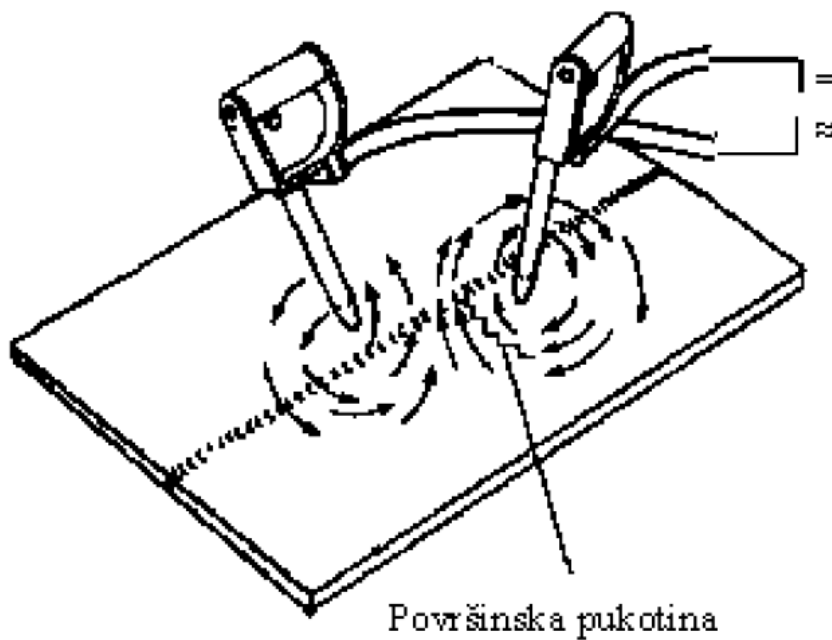


Slika 12: Indikacija pukotine magnetnim česticama [14]

Ova je metoda kontrole kvalitete relativno jeftina i brza, ali postoje određena ograničenja: moguća je kontrola samo do dubine od 6 mm, nije moguće odrediti dubinu pukotine i ima ograničenu primjenu samo na feromagnetne materijale [13].



Slika 13: Shematski princip magnetske kontrole [15]

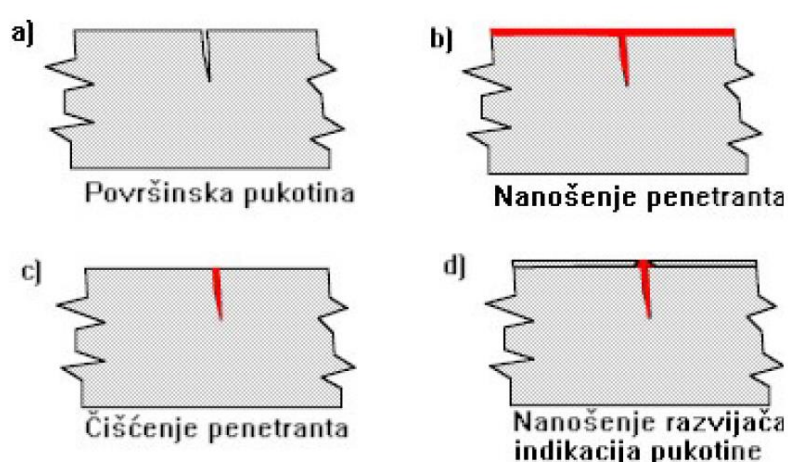


Slika 14: Dvojne elektrode [13]

3.2.4. Kontrola penetrantima

Penetrantska metoda jedna je od ranih metoda i izuzetno je jednostavna, brza i jeftina. Povezana je s vizualnom kontrolom s obzirom da se pukotine i nepravilnosti u materijalu uočavaju golim okom ili uz pomoć mikroskopa, eventualno uz primjenu povećala prilikom čega izvučeni penetrant olakšava uočavanje nepravilnosti i pukotina.

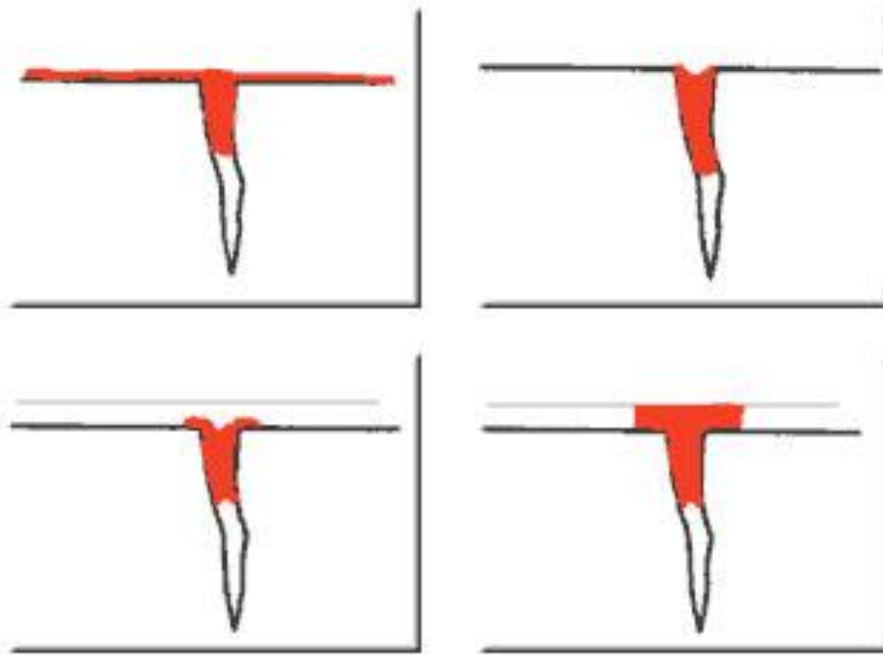
Ova metoda ima široku uporabu u praksi i često se koristi kod kontrole zavarenih spojeva. Za ovu kontrolu nije potrebno iskustvo, stručno osposobljavanje i nije potrebna veća priprema, te se može primjenjivati na svim metalima, a rezultati su lako i brzo uočljivi.



Slika 15: Shema izvođenja kontrole penetrantima [13]

Kvaliteta kontrole ovisi o stanju površine, mora se dobro očistiti prije nanošenja bilo kojega sloja. Mogućnost upotrebe ove metode ovisi o temperaturi jer su penetranti osjetljivi na visoke i niske temperature. Uzorci koji se ispituju moraju biti zaštićeni od atmosferskih utjecaja. Osim navedenih nedostataka, pojavljuju se i problemi kod ispitivanja prethodno bojanih površina, te kod spojeva sklonih koroziji [6].

Osim metala poput bakra, aluminijsa, čelika, titana i sl., penetrantskom metodom se mogu ispitivati i materijali poput stakla, keramike, gume ili plastike. Neke od nepravilnosti koje nam penetrantska kontrola omogućava otkriti su šupljine, poroznosti, propusnost stjenki i sl. Penetrantska kontrola se zasniva na principu kapilarnog učinka, što znači da penetrant prodire u prostore pukotina u ispitivanom objektu te nakon nanošenja razvijачa dolazi do izvlačenja penetranta iz pukotine na površinu koja omogućuje indikaciju pukotine [9] (Slika 15).



Slika 16: Primjer otkrivanja pukotina penetrantima [30]

Penetrantska kontrola prema obliku izvučenog penetranta pokazuje:

- Koncentracija crvenih točaka: poroznost i rupičavost,
- Naglo crvenjenje, ravno, kontinuirano: velike pukotine,
- Razlomljene crte - male pukotine,
- Niz crvenih točaka koje tvore nepravilnu crtu: posljedice umora materijala

Vrste penetranta dijele se na obojene i fluorescentne. Obojeni penetranti sadrže najčešće crvenu boju koja daje visok kontrast u odnosu na bijelu podlogu razvijaa, kao što je prikazano na slici 16. Prednost obojenih penetranta je u njihovoj otpornosti prema onečišćenjima kao što su tekućina za čišćenje, krpice za čišćenje i dr. Obojeni penetranti su puno jednostavniji za upotrebu i jeftiniji s obzirom da za njih nije potrebno stvoriti posebne uvijete poput zamračenja prostora i UV svjetla, kao što je slučaj kod primjene fluorescentnih penetranta. Fluorescentni penetranti, za razliku od obojenih sadrže boju ili nekoliko vrsta boja koje svijetle fluorescentno kada su izložene UV zračenju [16].

3.2.5. Ultrazvučna kontrola

Nerazorno ispitivanje metodom ultrazvuka ima vrlo široku primjenu u više tehničkih područja, samim time i u građevinarstvu. S obzirom da se u građevinarstvu vrlo često koriste čelične konstrukcije, vrlo je česta i kontrola ultrazvučnim uređajem (Slika 17) [8].



Slika 17: Ultrazvučni uređaj Phasor XS [17]

Ultrazvučna metoda se zasniva na principu slanja zvučnih valova određenog spektra frekvencija i svojstvu ultrazvuka da se širi kroz homogene materijale te da se odbija na granici materijala različitih akustičnih osobina (nehomogenosti, tj. grešaka u materijalu). Ako u materijalu postoje greške, ovisno o vrsti greške, ultrazvučni valovi će ili oslabjeti ili se neće pojaviti, odbiju se od greške. Time se podrazumijeva traženje pogrešaka u materijalu pomoću ultrazvuka, drugim nazivom defektoskopija [6].

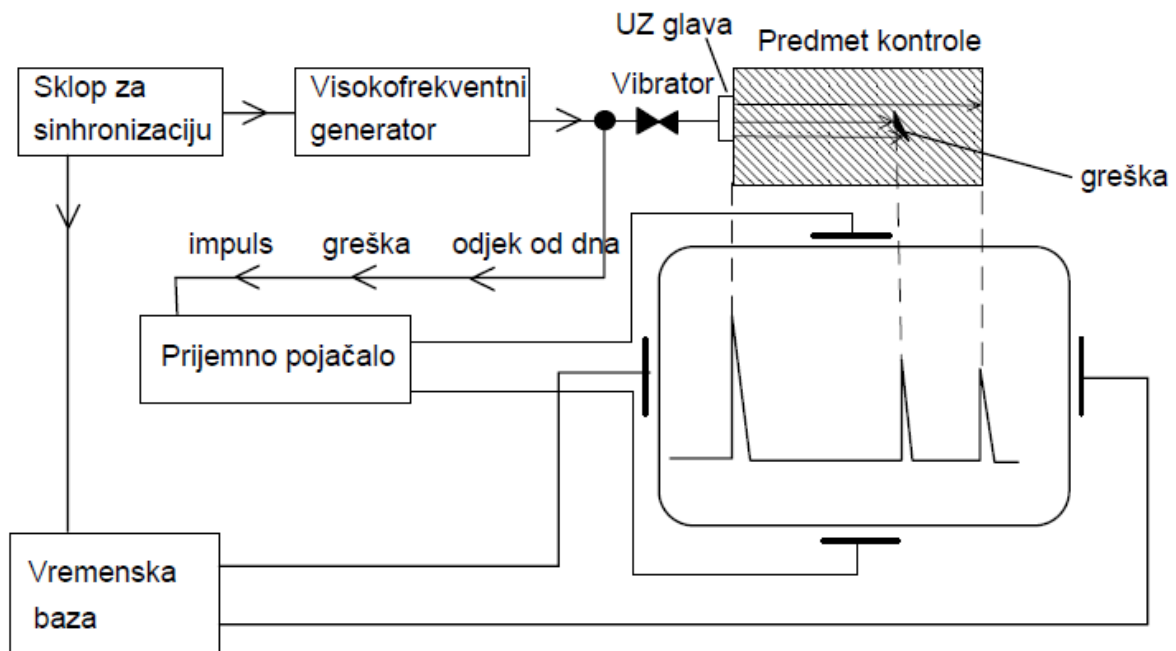


Slika 18: Primjer ultrazvučnog ispitivanja [18]

Ultrazvuk je naziv za frekvencije iznad područja čujnosti. Kod ove metode se koriste frekvencije od 0,5 – 10 MHz. Postoji nekoliko različitih vrsta ultrazvučnog ispitivanja. Najčešće metode koje se koriste su eho impulsna metoda i metoda prozvučavanja. Kod takvih se metoda najčešće koriste dva tipa ultrazvučnih glava, ravna i kutna ultrazvučna glava. Ultrazvučna metoda je osobito prikladna za otkrivanje pukotina, ali ovom se metodom mogu otkriti i nepravilnosti poput troske, plinskih mjehurića ili mjehurića u nizu. Kod metode prozvučavanja mjeri se slabljenje ultrazvučnih valova prilikom prolaska kroz ispitni uzorak. Na mjestima bez greške, nastaju mnogo manja oslabljenja nego na mjestima s greškom. Postupak je pogodan kod ispitivanja tankih uzoraka i omogućava pronalaženje grešaka, ali ne ukazuje na kojoj se dubini greške pojavljuju [16].

Za razliku od metode prozvučavanja, impulsna eho metoda šalje samo nekoliko titraja nakon kojih slijedi pauza. Valovi koji su nastali od nekoliko titraja nazivaju se impulsi. Oni prolaze kroz ispitivani uzorak, odbijaju se od njegove stražnje strane ili s mjesta eventualne pogreške čime se vraćaju kao odjek. Ovom metodom se također mjeri ukupno vrijeme od odašiljanja impulsa pa sve do povratka, što omogućuje da na osnovi ukupnog vremena zaključimo na kojem se mjestu pojavljuje refleksija, odnosno pukotina. Dvije velike prednosti ove metode su što je na osnovi vremena moguće relativno precizno odrediti na kojoj se dubini ispod površine nalazi pukotina ili nepravilnost, sljedeća prednost je u činjenici da ispitni uzorak mora biti pristupačan sa obje strane, već je moguće provesti ispitivanje samo s jedne strane ispitnog uzorka (Slika 18) [16].

Prilikom kretanja ultrazvuka kroz materijal, veoma je važno odrediti akustičnu impedanciju, koja je za svaki materijal poznata, ali se znatno razlikuje kod svake vrste materijala (Slika 19). Ultrazvučna kontrola ne omogućava određivanje pogreške nego se pomoću nje određuje veličina, položaj i orijentacija pogreške. Zato je za kvalitetno provođenje ispitivanja potrebno mnogo iskustva i znanja što je veliki nedostatak, ali i prednost prilikom primjene ove metode.



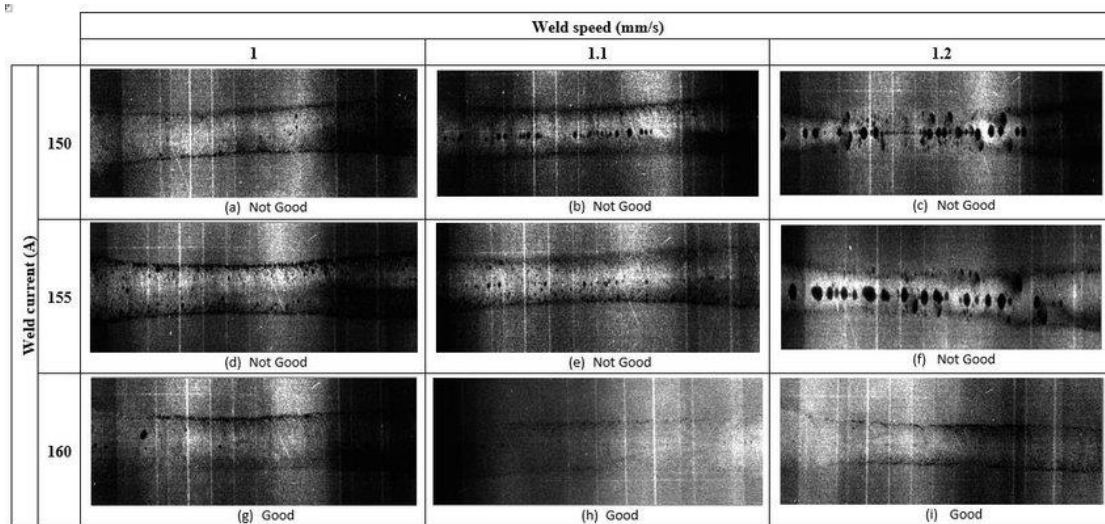
Slika 19: Shematski prikaz ultrazvučne metode [6]

Prednosti ultrazvučne metode u odnosu na druge metode su mnogobrojne, ali uz njih dolaze i neki od ne željenih nedostataka. Ispitivanje je moguće provesti na uzorcima i spojevima različitih dimenzija, pristup je potreban samo s jedne strane, okolina u kojem se uzorak ili konstrukcija nalaze nije bitna, uređaj i pribor koji se koristi tijekom ispitivanja su relativno malih dimenzija i lako se prenose te provođenje ispitivanje ne zahtijeva veliku pripremu kao niti zaštitna sredstva. Sa druge strane složeni oblici i zavari mogu biti nepogodni za provođenje ispitivanja, uvježbavanje operatera za provođenje ispitivanja je dugotrajno, te kako bi se pouzdano mogle odrediti pogreške potreban je pristup s više strana, čime se značajno povećava utrošak vremena [6].

3.2.6. Radiografska metoda

Radiografska metoda ili ispitivanje prozračivanjem, metode su radijacijske kontrole koje omogućavaju kvalitativno i kvantitativno praćenje nepravilnosti u strukturi ili kroz presjek ispitivanog uzorka. Radijacijske metode većinom informacije dobivaju prozračivanjem objekta odgovarajućim ionizirajućim zračenjem [16].

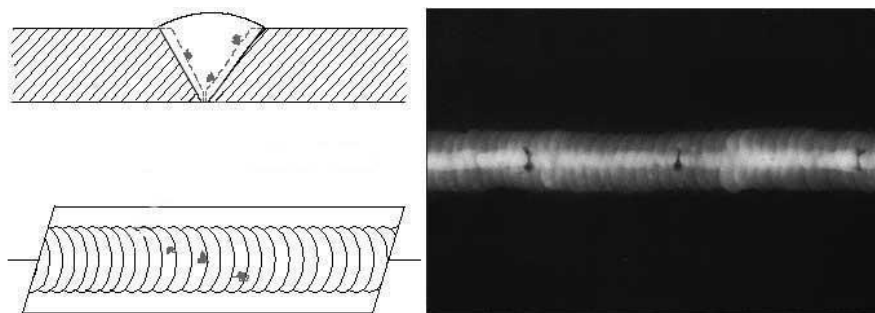
Osnovni princip ove metode se bazira na zračenju koje nakon prolaska kroz objekt poprima informacije o objektu zbog međudjelovanja zračenja i materijala objekta. Visine i oblici intenziteta zračenja mogu se očitati na više načina, što ovisi o učinku djelovanja zračenja materijala. Kod metoda prozračivanja razlikujemo metodu radiografije i gamagrafije. Radiografija se zasniva na principu rendgenskog ispitivanja, dok se kod gamagrafije ispitivanje provodi radioaktivnim izotopima. Radiografijom se primjenjuju rendgenske zrake i pomoću njih se otkrivaju unutarnje greške i nehomogenost materijala. Najčešće se primjenjuje u praksi. Kod ove metode se registriraju razlike intenziteta ionizirajućeg zračenja koje je prošlo kroz objekt ispitivanja uzrokovane različitom apsorpcijom u pojedinim dijelovima ispitivanog uzorka. Interpretacija rezultata je prikazana stvaranjem stalne slike, koja se zove radiogram. Postupak ispitivanja započinje postavljanjem ispitivanog uzorka između rendgenske cijevi i fluorescentnog filma ili ekrana. Metoda kod koje se koristi film naziva se fotometoda, a metoda prilikom koje se koristi fluorescentni ekran naziva se metoda vizualnog prozračivanja. Fotometoda zbog svoje jednostavnosti i preglednosti pronalazi svoje mjesto u industriji, određivanje grešaka sastoji se u dobivanju slika prozračenog ispitanog materijala u obliku filma ili fotografije. Svaka greška unutar ispitanog uzorka pokazuje se na filmu kao različito zacrnjenje. Osim grešaka u materijalu radiografijom se mogu uočiti i greške nastale prilikom korištenja proizvoda ili pogreške u tehnološkim postupcima. Najčešće se koristi kod otkrivanja pogrešno zavarenih spojeva, poroznosti, uključaka, troske, nepovarenog korijena i sl. Metoda nije pogodna za otkrivanje pogrešaka poput pukotina jer se mogu samo otkriti one koje su položene u smjeru zračenja. Razlika radiografije u odnosu na gamagrafiju je u tome što se izvor radijacije može uključiti, isključiti i modificirati prema potrebama, na taj se način omogućuje brza i točna ispitivanja (Slika 20) [16].



Slika 20: Rezultati radiografske metode ispitivanja zavara [19]

Za razliku od radiografske metode, gamagrafska metoda se bazira na primjeni radioaktivnih izotopa pomoću kojih se otkrivaju greške i nepravilnosti u materijalu, tj. ispitivanom uzorku. Umjetne radioaktivne izotope moguće je proizvesti različitih standardnih dimenzija i aktiviteta, ovisno o uređajima kojima se provodi ispitivanje. Uređaji za ispitivanje gamagrafskom metodom se nazivaju defektoskopi [16].

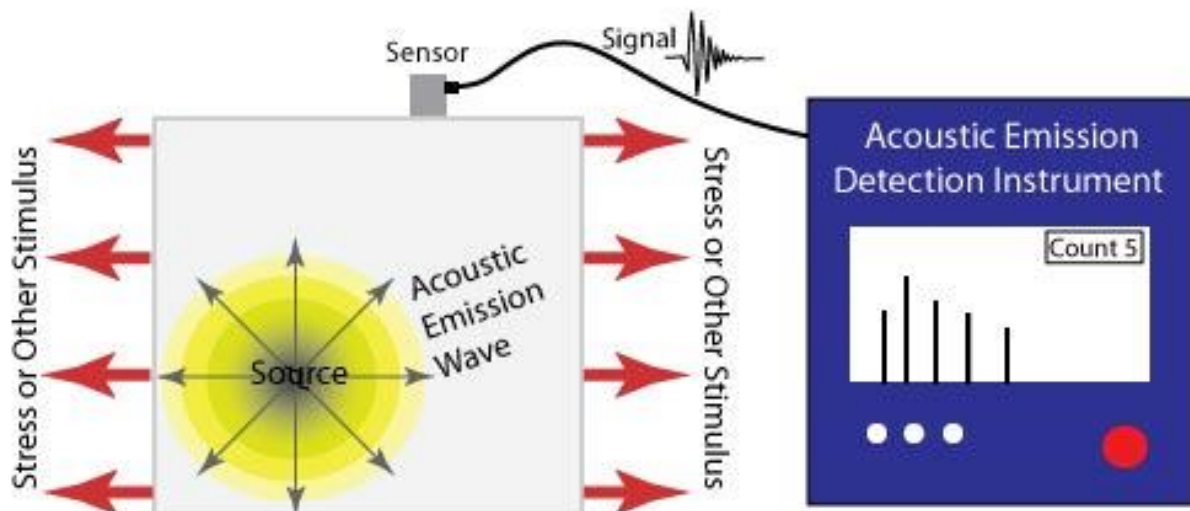
Radioaktivne gama zrake imaju svojstvo prodiranja kroz sve materijale uslijed malih valnih duljina. Propuštanje gama zraka ovisi o vrsti materijala kroz koji se propuštaju (Slika 21). Materijali male atomske mase vrlo dobro propuštaju gama zrake, dok ih materijali s velikom atomskom masom znatno apsorbiraju. Osjetljivost radiograma određuje se veličinom najmanje greške koja se može otkriti. Svaka greška unutar ispitivanog uzorka pojavljuje se na snimci kao zacrnjenje. Prilikom izbora gama izvora nužno je voditi računa o vrsti i debljini ispitivanog uzorka, vremenu poluraspada radio izotopa, raspoloživim aktivnostima i dimenzijama radioaktivnih izotopa [16].



Slika 21: Rezultati gamagrafske metode ispitivanja zavara [21]

3.2.7. Akustična kontrola (akustična emisija)

Način rada ove metode se temelji na principu emitiranja kratkih titraja akustične energije na vrhu pukotine prilikom izlaganja materijala naprezanju, metoda se odnosi samo na čvrste materijale (Slika22). Kao što je slučaj kod ultrazvučnog testiranja i akustične emisije se mogu otkriti specijalnim prijamnicima, pisačima. Intenzitet u ovisnosti o vremenu se prikazuje na pisaču i određuje se izvor titraja i lokacija pukotine. Dobivene lokacije je potrebno detaljnije ispitati jer nam ova metoda ne daje detaljno koliko je oštećenje unutar konstrukcije, najčešće se dodatna ispitivanja provode ultrazvučnim uređajem. Razlika akustične kontrole i drugih nerazornih metoda ispitivanja je u tome što se u ispitivani uređaj ne ispuštaju vrste energije već se pomno sluša energija koju ispušta ispitivani uzorak. Također akustična kontrola daje trenutne informacije o opasnosti greške na testiranoj konstrukciji i o njenom utjecaju na konstrukciju. Prije provedbe akustične emisije nisu potrebni pripremni radovi i ispitivanje se može brzo izvršiti [20].



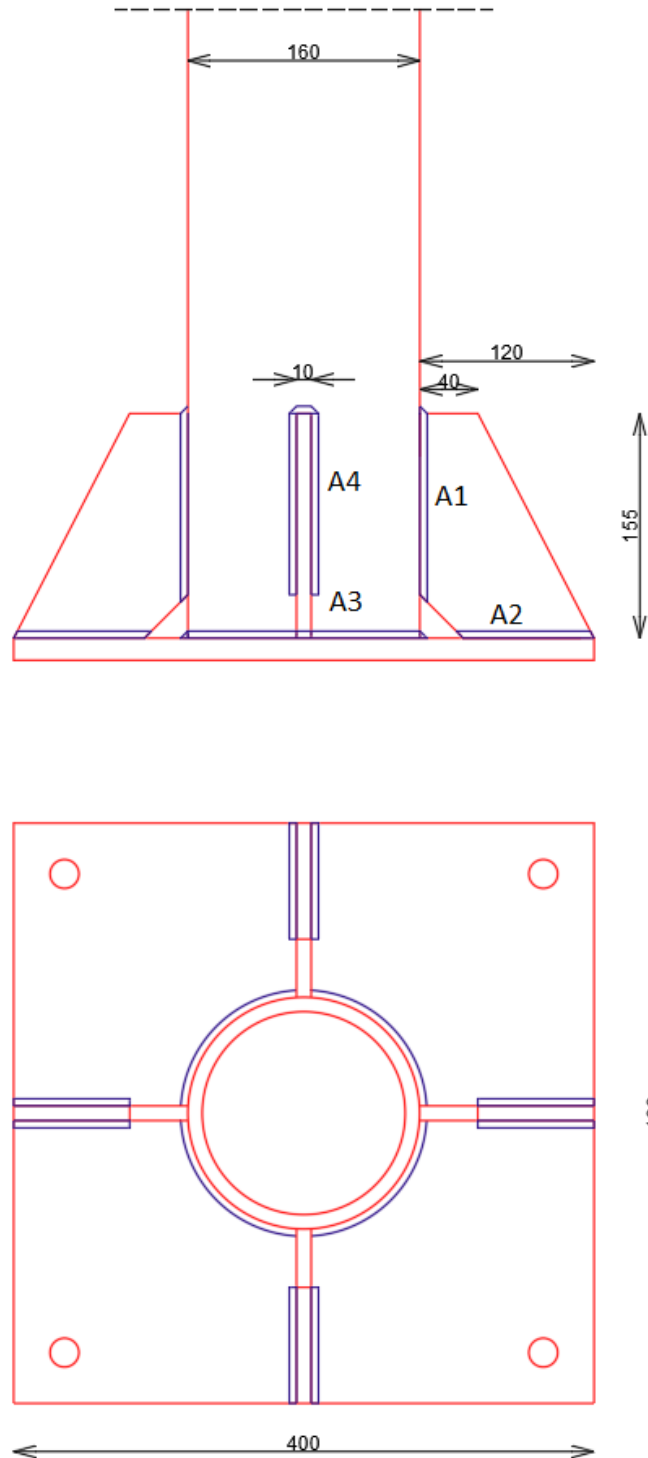
Slika 22: Princip akustične emisije [20]

4. PRAKTIČNI RAD

U ovom dijelu je prikazana praktična primjena triju nerazornih metoda s ciljem utvrđivanja nepravilnosti i pukotina na zavarenim uzorcima. Mjerenja su provedena na četiri primjera koji su označeni sa A, B, C i D. Uzorak A je primjer stupa koji je rastavljen i odložen za buduću upotrebu, ako bude potrebno. Uzorak B je primjer čeličnog spoja nosač-stup i testiran je u sklopu diplomskog rada na savijanje. Uzorak C je produžena greda koja služi za daljnja ispitivanja nosivosti. Uzorak D je stup koji služi kao jarbol ispred Građevinskog fakulteta u Rijeci. Ispitivanja koja su provedena su vizualna kontrola, kontrola penetrantima i kontrola ultrazvučnim uređajem Phasor XS. Provedena su u laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci te sukladno uputama Hrvatskog centra za nerazorna ispitivanja CeNI.[22]

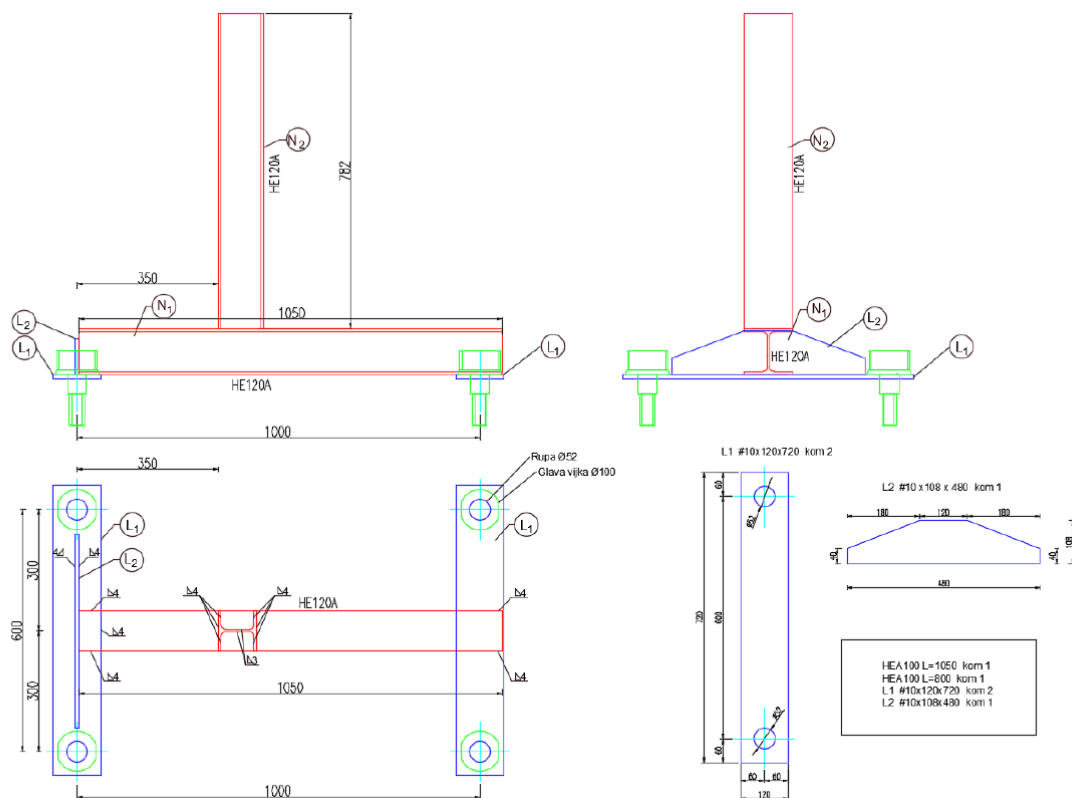
4.1. Opis konstrukcijskih elemenata

Konstrukcijski elementi na kojima su provedena laboratorijska ispitivanja su jednostavni dijelovi čelične konstrukcije. Uzorak A je primjer rasvjetnog stupa (Slika 23). Stup se na temelj spaja sa četiri vijka, učvršćenih na četiri navojne šipke usidrene u armirano-betonski temelj. Zavari se nalaze na spoju ploče i stupa, te na spoju stupa i ukruta te podložne ploče i ukruta. Debljina zavara iznosi 5 mm i zavari su grubo izvedeni. Zavari na uzorku A su označeni oznakama A1, A2, A3 i A4.



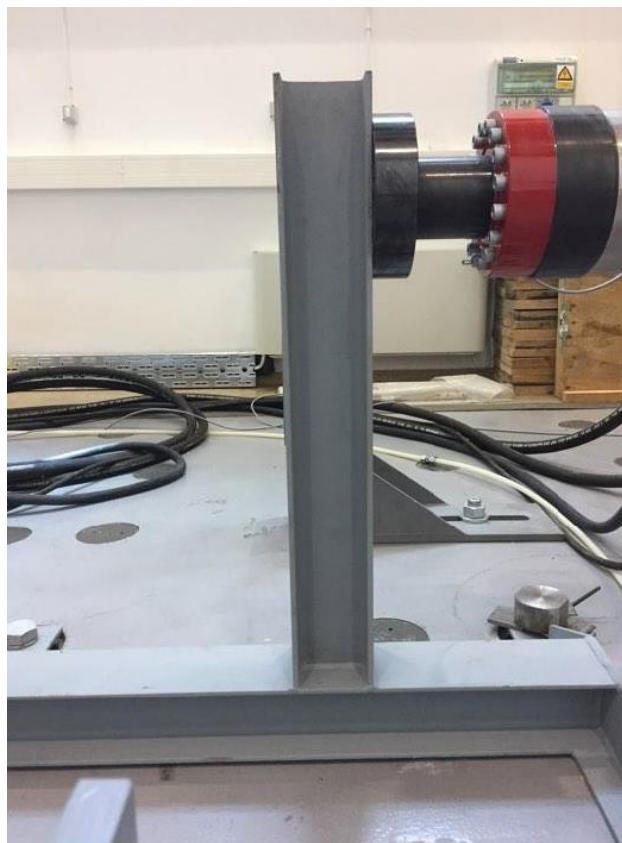
Slika 23: Uzorak A (Izradio autor)

Uzorak B je primjer priključka stupa i nosača koji su spojeni kutnim zavarima čije su dimenzije prikazane na slici 24. Element je zavaren uzduž svih dijelova koji se dodiruju. Za navedeni element su provedena ispitivanja na savijanje u okviru diplomskog rada u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci. Ovaj uzorak je jedini od ispitanih na kojemu je provedeno ispitivanje zavora nakon što je uzorak bio izložen djelovanju savijanja (Slika 25).



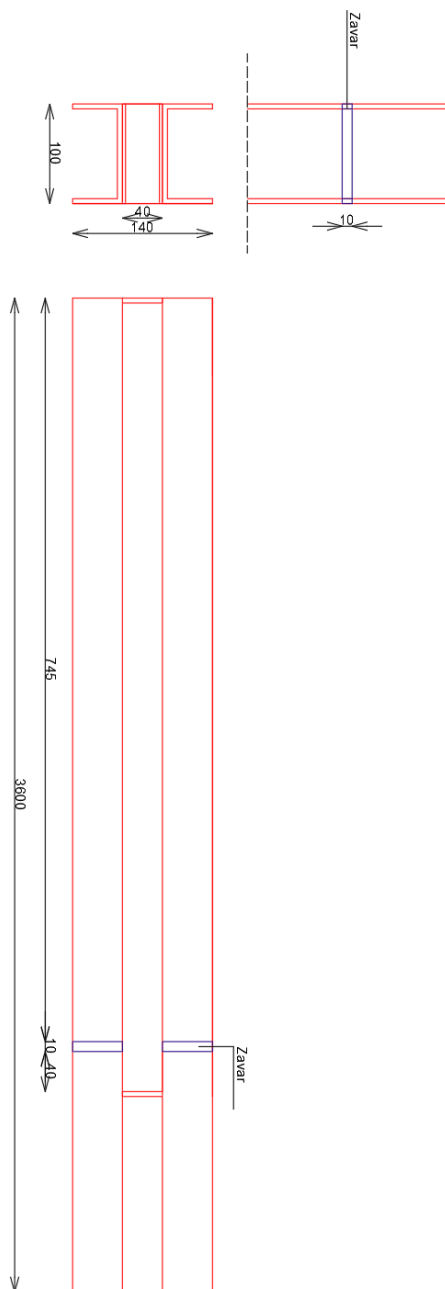
Slika 24: Priključak stupa i nosača (Uzorak B) [24]

Na slici 25 je prikazan prijašnje testiranje elementa.



Slika 25: Ispitivanje priključka nosača i stupa na savijanje [24]

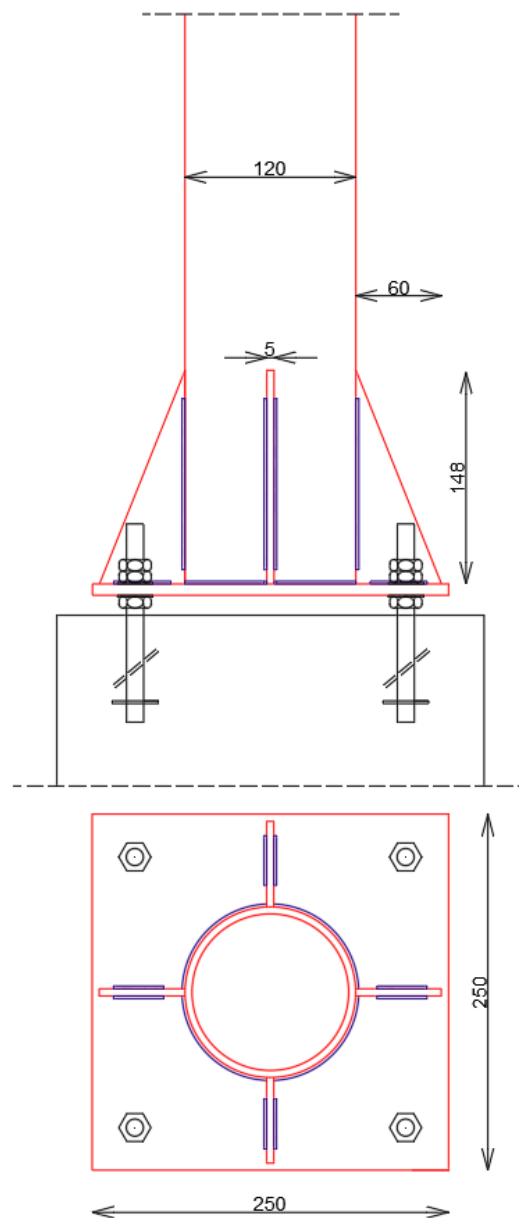
Uzorak C (Slika 26) je primjer nastavka dvaju nosača izveden sučelnim zavarima. Zavar je izveden uz kompletan spoj dvaju elemenata. Debljina zavara iznosi 10 mm, nalazi se na dva mjesta unutar elementa, 75 cm od krajeva.



Slika 26: Uzorak C (Izradio autor)

Uzorak D je primjer inox stupa nosača zastave i sl. Stup je izveden od cijevi ϕ -promjera 120 mm zavarene na ležajnu ploču sa zavarenim ukрутama na 4 mjesta. Ležajna ploča je s 4 vijka M20 spojena na 4 navojne šipke usidrene u armirano betonski temelj, kako je prikazano na slici

27.



Slika 27: Model stupa uzorak D (Izradio autor)

4.2. Vizualna kontrola zavarenih spojeva

Prije svake metode testiranja, potrebno je provesti vizualnu kontrolu s obzirom da ne oduzima puno vremena i nije potrebna velika količina iskustva, a daje brze informacije o izvedenim zavarenim elementima.

Vizualna kontrola je provedena na svim testnim uzorcima (A, B, C, D) Na uzorku B, je uočena velika pukotina nastala prilikom ispitivanja zavarenog elementa na savijanje. Na uzorku A je

vidljiva gruba izvedba zavora, dok na uzorcima C i D nisu uočene nepravilnosti.



Slika 28: Pukotina na zavarenom uzorku B [24]

Kao što je prikazano na slici 28, pukotina je lako uočljiva i vidljivo je da se radi o potpunom slomu u zavarenom spoju što je logično jer je uzorak prethodno ispitivan na savijanje.

4.3. Penetrantska kontrola zavarenih spojeva

4.3.1. Opis postupka provedbe kontrole penetrantima

Nakon provedbe vizualne kontrole na svim uzorcima je provedena kontrola penetrantima. Jednostavna metoda koja relativno brzo daje rezultate sa minimalnom pripremom i bez potrebnog iskustva. Prilikom ispitivanja korišten je obojeni crveni penetrant (Slika 29).



Slika 29: Sredstva za provedbu ispitivanja (čistač, penetrant i razvijatelj, s lijeva na desno) (Izradio

autor)

Za provedbu ispitivanja primijenjena su tri osnovna sredstva: čistač, penetrant i razvijatelj.

Postupak izvođenja penetrantske kontrole:

1. Na ispitni uzorak nanijeti čistač, te obrisati površinu papirom (Slika 30)



Slika 30: Nanošenje čistača [28]

2. Nakon detaljnog postupka čišćenja, na zavar nanijeti penetrant (Slika 31),



Slika 31: Postupak nanošenja crvenog penetranta [28]

Penetrantu je potrebno 10 minuta za sušenje i kako bi prodirao kroz pukotine u materijal ispitnog uzorka. Višak penetranta sa površine ukloni se papirom. Prilikom ovog postupka se može ponovno upotrijebiti čistač u manjim dozama.

3. Nakon čišćenja viška penetranta s površine zavara, nanijeti razvijač, kojemu je potrebno nekoliko trenutaka za izvlačenje penetranta iz pukotine (Slika 32),



Slika 32: Primjer nanošenja razvijača [28]

Nakon izvlačenja penetranta, provesti pregled penetrantske indikacije i donose zaključci o uočenim nepravilnostima. Kao i kod svake vrsta rada ili ispitivanja posljednji korak se sastoji od čišćenja radne površine i uzorka.

4.2.1. Rezultati ispitanih uzoraka

Uzorak A:

Na slici 33 prikazan je uzorak A, nakon čišćenja i nanošenja penetranta.



Slika 33: Uzorak A nakon nanošenja penetranta

Rezultat nakon nanošenja razvijaa je prikazan na slici 34. Kao što je vidljivo na slici, po sredini zavora nema pukotina, uz rubove zavora su vidljive nakupine penetranta iz razloga što nije bilo moguće potpuno očistiti udubine nastale prilikom izvođenja zavora. Iz tog razloga nije moguće sa sigurnošću odrediti radi li se o pukotinama ili samo o nakupinama penetranta.



Slika 34: Zavar A4

Na slici 35 prikazan je zavar A3, kod kojega je već vizualnom kontrolom moguće uočiti grešku prilikom izvođenja zavara. Kod te greške je penetrant prodirao unutar žlijeba i nije ga bilo moguće odstraniti prije nanošenja razvijaača čime nisu dobiveni vjerodostojni rezultati o stanju zavara i potrebno ga je testirati nekom drugom metodom kako bi se dobio uvid u stvarno stanje zavara. Kako se zavareni element ne koristi nije potrebno provoditi daljnja ispitivanja.



Slika 35: Zavar A3

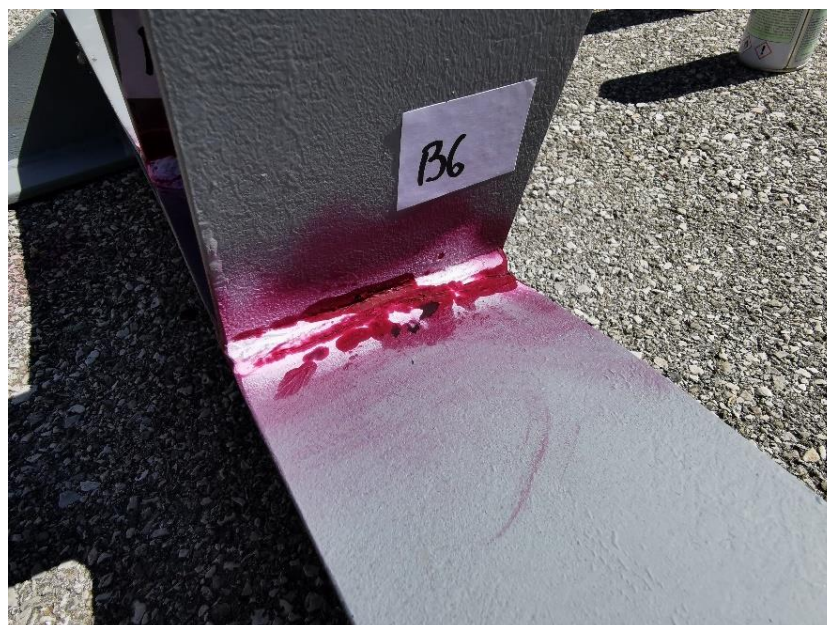
Na uzorku A, zbog grube izvedbe zavora, nisu lako vidljive pukotine, ali se mogu uočiti utori uz žlijeb zavora iz kojih se penetrant nije mogao očistiti. Rezultati ispitivanja na ovom uzorku nam ukazuju kako se penetrantskom kontrolom mogu ispitivati sve vrste zavora, ali rezultati na lošije izvedenim zavarima nisu vjerodostojni i nije moguće uočiti razliku između pukotina i udubina prilikom izvođenja zavora.

Uzorak B:



Slika 36: Uzorak B s nanesenim penetrantom (Izradio autor)

Na slici 36. je prikazan uzorak B, nakon čišćenja i nanošenja penetranta. Nakon nanošenja razvijača lako su vidljive pukotine na zavaru B6 (Slika 37).



Slika 37: Pukotina na zavaru B6 (Izradio autor)

Nakon što je prošlo vrijeme dano penetrantu za prodiranje unutar pukotina, penetrant sa površine je uklonjen i površina je spremna za nanošenje razvijaača. Nakon nekoliko trenutaka poslije nanošenja razvijaača bilo je moguće uočiti greške prilikom zavarivanja. Na slici 38. vidljive su točkice zavara B1 koje ukazuju na poroznost zavara.



Slika 38: Poroznost kod zavara B1 (Izradio autor)

Nakon detaljnog pregleda zavara B3, B4 i B5 vidljive su nakupine penetranta. Na slici 39 vidljive su nakupine penetranta, rezultate nije bilo lako očitati s obzirom da se radi o teže dostupnom mjestu na kojem se nalaze zavari.



Slika 39: Zavari B3, B4 i B5 (Izradio autor)



Slika 40: Velika pukotina na zavaru B2 (Izradio autor)



Slika 41: Velika pukotina na zavaru B6 (Izradio autor)

Na slikama 40 i 41 vidljivo je kako izgleda izvlačenje penetranta razvijačem iz velikih pukotina. Vidljivo je da se radi o strukturalnim pukotinama koje mogu ugroziti nosivost cijele konstrukcije. Nakon kontrole elementa B zaključuje se kako element nije moguće ugraditi zbog velikih pukotina koje su se javile kod prekoračenja nosivosti ili ako bi se radilo o već ugrađenom elementu bila bi potrebna sanacija tog elementa ili kompletna zamjena kako se nebi daljnje ugrožavala stabilnost cijele konstrukcije. Rezultati ovog ispitivanja već su od prije bili poznati s obzirom da se radilo o elementu prethodno izloženom djelovanju savijanja do sloma.

Uzorak C:

Ispitivanje na uzorku C je dalo lako uočljive rezultate. Radilo se o nastavku H profila spojenih zavarima. Na slici 42 je prikazan ispitivani element.



Slika 42: Uzorak C (Izradio autor)

Na ispitnom uzorku nakon ispitivanja penetrantom lako je uočljiva pukotina u zavaru, koja je nastala najvjerojatnije prilikom postupka zavarivanja s obzirom da element nije bio u upotrebi. Na slici 43 je vidljiva pukotina u kontinuitetu zavara, te manje greške koje ne utječu na nosivost zavara.



Slika 43: Pukotine na zavaru C2 (Izradio autor)

Uzorak D:

Element je ispitan prema identičnom postupku kao i svi drugi uzorci. Na slici 44 je prikazan stup sa nanesenim razvijačem.



Slika 44: Stup sa razvijačem (Izradio autor)

Rezultati ispitivanja su potvrdili kako su zavari dobro izvedeni i kako na svim zavarima nema pukotina niti grešaka, što je prikazano na slici 45. Vidljivi tragovi penetranta na zavaru D2 su izvučeni iz kuta koji nije zavaren.



Slika 45: Rezultati ispitivanja uzorka D (Izradio autor)

Provedena ispitivanja potvrđuju kako je penetrantska kontrola brza i učinkovita metoda detektiranja nepravilnosti kod raznih vrsta zavarenih spojeva: Niski troškovi ispitivanja, jednostavnost, efikasnost i brzina ispitivanja ju čine jednom od najisplativijih i najčešće korištenih kontrola na zavarenim spojevima u praksi.

4.3. Ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva

Ultrazvučnom metodom je izmjerena debljina kalibracijskog uzorka i jednog dodatnog uzorka prikazanog na slici 46.



Slika 46: Uzorak za ispitivanje ultrazvučnom metodom (Izradio autor)

Alati i oprema korišteni prilikom ispitivanja:

- Uređaj Phasor XS
- Ravna sonda (Slika 51)
- Ultrazvučni gel

Na slici 47 prikazan je uređaj Phasor XS koji je korišten za ispitivanje.



Slika 47: Ultrazvučni uređaj Phasor XS [29]

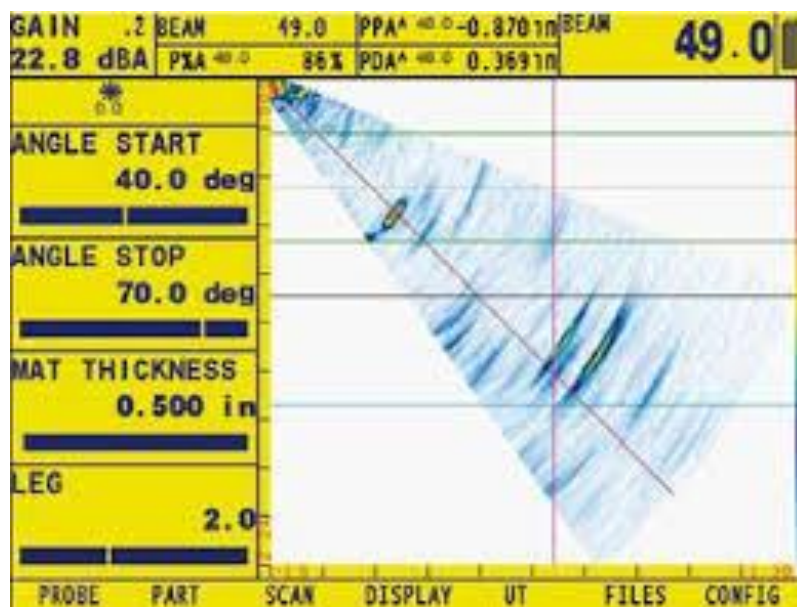
Postoji nekoliko vrsta sonde koje se koriste kod ultrazvučnog ispitivanja (Slika 48), a to su kutne i dvostruke. Osim klasičnih sonde koje se koriste kod konvencionalnog načina rada uređaja Phasor XS, za provođenje ispitivanja postoje posebne sonde koje se koriste kod Phased Array moda (Slika 49). Phased array način rada prikazuje ultrazvučni prikaz sličniji onome pri provođenju ultrazvuka na ljudima ili životinjama (Slika 50), dok se kod konvencionalnih metoda gledaju ultrazvučni valovi i iz njih se očitavaju sve nepravilnosti. Sonda korištena za vrijeme ispitivanja je ravna sonda.



Slika 48: Sonde konvencionalnog načina rada [27]



Slika 49: Phased array sonde [25]



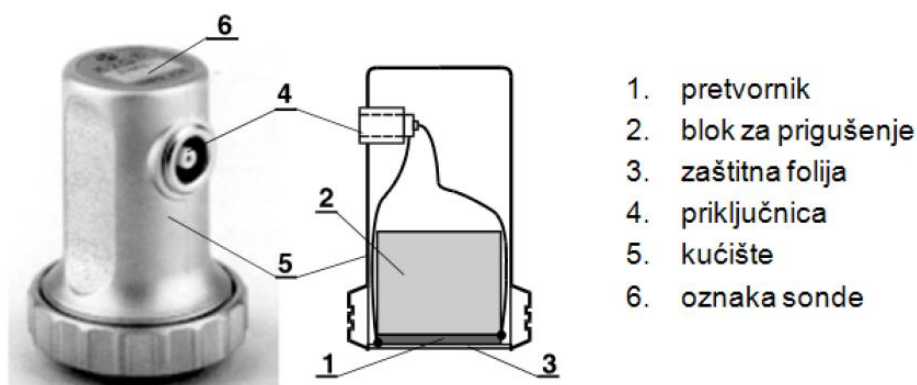
Slika 50: Prikaz Phased array načina rada [26]

Postupak izvođenja ultrazvučne metode je opisan u [22] te je ispitivanje provedeno prateći njihove upute. Tijekom izvođenja ispitivanja popunjava se odgovarajući obrazac u koji se upisuju podaci o ispitivanju:

U obrazac se upisuju podaci o sustavu ultrazvučnog testiranja:

- Ultrazvučni uređaj : Phasor XS,
- Sonda: Ravna (slika 51),
- Ispitna frekvencija: 4 MHz,
- Kabel,

- Kontaktno sredstvo: ultrazvučni gel,
- Uzorci za podešavanje osjetljivosti i dr.



Slika 51: Shematski prikaz ravne sonde [22]

Osim podataka o uređaju i vrsti ispitivanja potrebno je unijeti i podatke o ispitnom uzorku:

- Potrebno je skicirati objekt tlocrtno, te izmjeriti i označiti dimenzije,
- Na skici treba označiti i referentnu točku,
- Označiti ishodište koordinatnog sustava i orijentaciju osi

Kako bi uređaj bio spreman za korištenje potrebna je kalibracija uređaja ili baždarenje. Provodi se pomoću kalibracijskog bloka izrađenog za baždarenje kakav je prikazan na slici 52.



Slika 52: Kalibracijski blok prema ISO 7963 [23]

Koraci podešavanja rada uređaja Phasor XS:

1. Na uređaj spojiti sve potrebne dijelove poput baterije i kabela za napajanje.
2. Ravnu sondu priključiti u gornji priključak-
3. Upaliti uređaj pritiskom na žutu tipku koja se nalazi u donjem lijevom kutu. Pričekati nekoliko trenutaka da se uređaj upali te da se softver pokrene.
4. Prilikom pokretanja uređaja ponuđene su dvije metode korištenja uređaja. Za jednostavnija mjerenja odabrati konvencionalni način jer se koristi ravna sonda koja nije namijenjena za „phased array“ način rada i jer je konvencionalan način jednostavniji za upotrebu. Na Slici 53 je prikazan preglednik za konvencionalni način rada uređaja.



Slika 53: Prikaz preglednika za konvencionalan način rada (Izradio autor)

5. Postaviti maksimalnu dubinu mjerenja opcijom RANGE.
6. Unijeti podatke za PROBE DELAY koji se podešava tijekom kalibracije i predstavlja kašnjenje ultrazvuka zbog prolaska kroz pleksi pločicu sonde, membranu ili klin, te podatke o brzini (VELOCITY) longitudinalnih ili transverzalnih valova u ispitanom materijalu. Postavke za PROBE DELAY i VELOCITY kalibrirati za svaki ispitni uzorak posebno, osim ako se radi o istom materijalu. Namjestiti postavke za DISPLAY DELAY što se odnosi na pomicanje nulte pozicije ekrana, tj. pomicanje grafa lijevo ili desno za olakšavanje vidljivosti.
7. U izborniku SETUP odabrati podizbornik RECIEVER te podesiti frekvenciju ovisno o vrsti sonde. Frekvencija je definirana na sondi. Za ravnu sondu iznosi 4 MHz. Korištenjem veće frekvencije skraćuje se valna duljina i dobiva se rezultat prikazan u visokoj rezoluciji. Većom frekvencijom se prodire dublje u materijal, jer manja

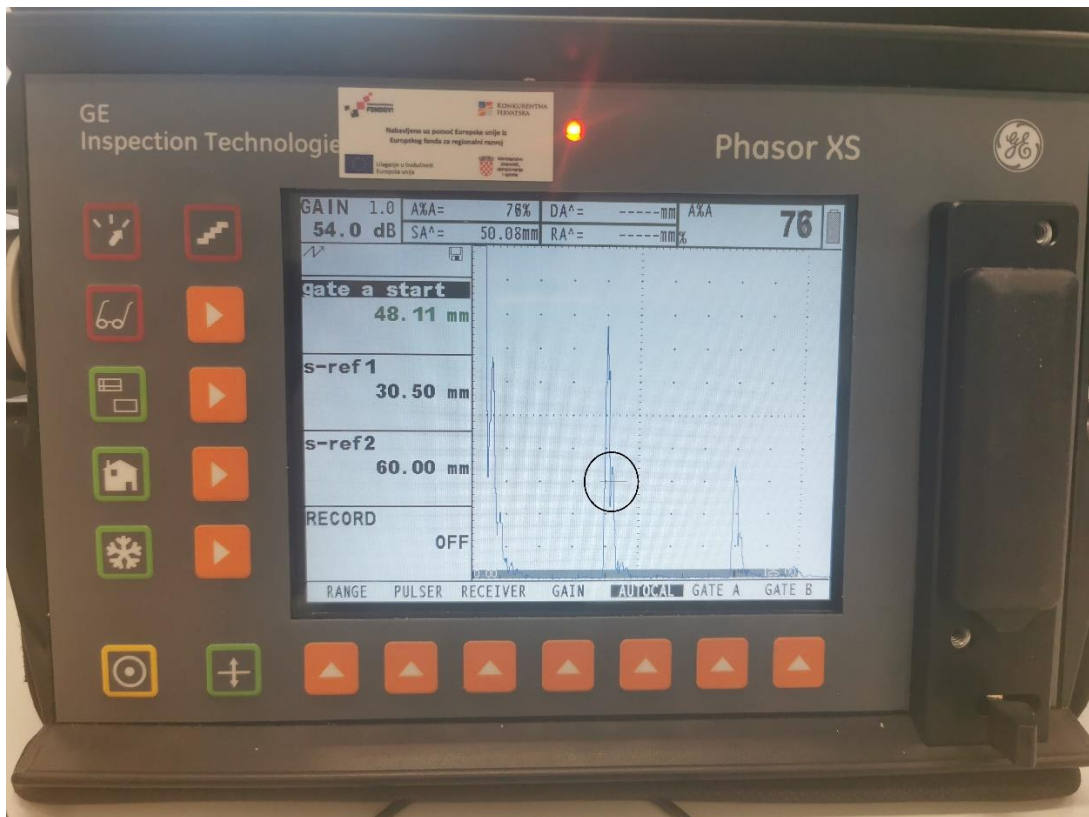
frekvencija znači i manje oslabljenje signala. Pod RECTIFY postaviti vrstu prikaza grafa na FULLWAVE jer je on mjerodavan i potreban za kalibraciju. Nakon kalibracije je moguće odabrati drugačiju vrstu prikaza. REJECT za kalibraciju postaviti na 0. Postavke za DUAL namjestiti na OFF. Pulser je kontrola šuma i može biti ili 50 ili 1000, odnosi se na prigušivanje neželjenih šumova, postaviti na 50. PRF mode postaviti na AUTO.

8. Odabrati blendu za izmjeru, moguće je odabrati GATE A ili GATE B ili GATE A AND GATE B. O njima ovisi koji će se rezultati i na koji način će se pokazivati na ekranu.
9. Slijedi ispunjavanje podizbornika BLENDE, postaviti početak za GATE A (GATE A START), tj. od koje dubine se kreće sa mjerenjem. Nakon toga slijedi GATE A WIDTH, tj. od početne točke koliko duboko se mjeri ispravljanje šuma. Sljedeće A TRESHOLD, njime postaviti visinu izabrane A blende na grafu. TRESHOLD služi za sprječavanje utjecaja šuma, snima se visina amplitude i ovisi o decibelima. TOF mode služi za izbor mjerenja do vrha ili boka jeke. Postaviti na PEAK, tj. vrh jeke.
10. Ista pravila postavljanja vrijede i za GATE B, ali njega se uključuje prema potrebi. Prilikom ispitivanja nije korišten GATE B, jer se radilo o jednostavnim kalibracijskim uzorcima.
11. Postaviti logiku blendi na izborniku LOGIC (HOME-SETUP-GATEMODE). Odnosi se na određivanje aktivacije alarma kada signal presječe ili ne presječe blendu. Mogući odabiri su POSITIV kada blenda gleda samo pozitivne vrijednosti, NEGATIV kada blenda gleda samo negativne vrijednosti te OFF kada je blenda isključena. Nakon toga odabrati primaran izbor za alarm, alarm prikazan na slici 54, alarm je crvena led žarulja u gornjem dijelu na sredini uređaja, primaran izbor za alarm može biti blenda A, blenda B ili blendu A i B (OUTPUT SELECT – A ili B ili A i B).

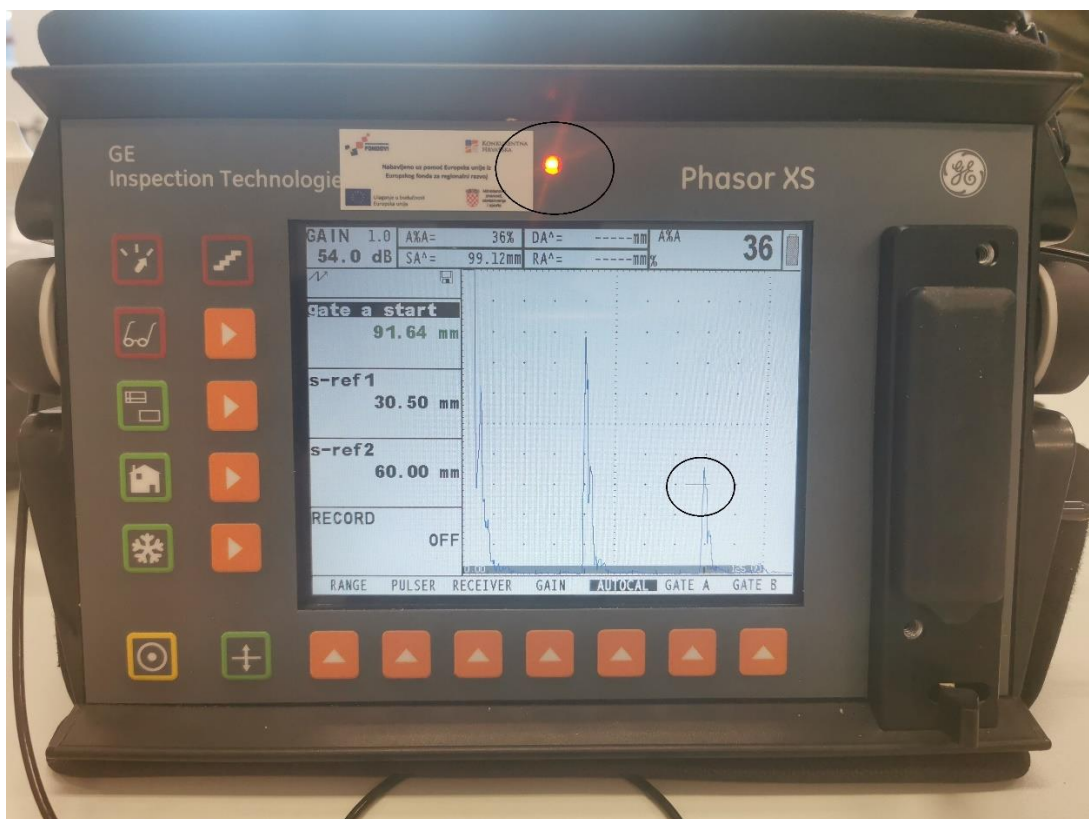


Slika 54: Alarm (Izradio autor)

12. Prije početka kalibracije upisuje se debljina ispitnog ili kalibracijskog uzorka (HOME – EVAL – TRIG – THICKNESS). U podizborniku TRIG podatke pod THICKNESS unijeti debljinu uzorka. Pod X – VALUE unijeti debljinu ispitnog uzorka pomnoženu sa 1,2. Ne smije iznositi više od 1,4 pomnoženo sa debljinom uzorka!
13. Kalibrirati prema određenom ispitnom uzorku. Pripremiti sondu, nanijeti gel između membrane i sonde te membrane i ispitnog uzorka. Obavezno sondu postaviti na kalibracijski uzorak! Postavke načina prikaza valova za kalibraciju namjestiti na FULLWAVE (HOME – SETUP – RECEIVER - FULLWAVE).
Nastaviti do podizbornika AUTOCAL (HOME – SETUP – AUTOCAL) te sa GATE A START presjeći prva dva zvučna signala, slika 55. Dobiveni broj lokacija GATE A START upisati pod S-REF 1. Nakon toga GATE A START pomaknuti gdje blenda siječe samo jedan signal, slika 56, te dobivenu duljinu zapisati pod S-REF 2 . GATE A START nakon toga vratiti na lokaciju S-REF 1 i pritisnuti RECORD dva puta. Promijeni se u S-REF 1, te u S-REF 2 te nakon toga GATE A START pomaknuti na lokaciju S-REF 2, nakon toga pritisnuti RECORD i uređaj javlja kako je kalibracija završena (AUTOCAL COMPLETE), to vrijedi u slučaju da je kalibracija pravilno izvedena, ako nije uređaj javlja da je došlo do greške (AUTOCAL FAILED). Vidljivo je kako je aktiviran alarm kada blenda siječe signal.

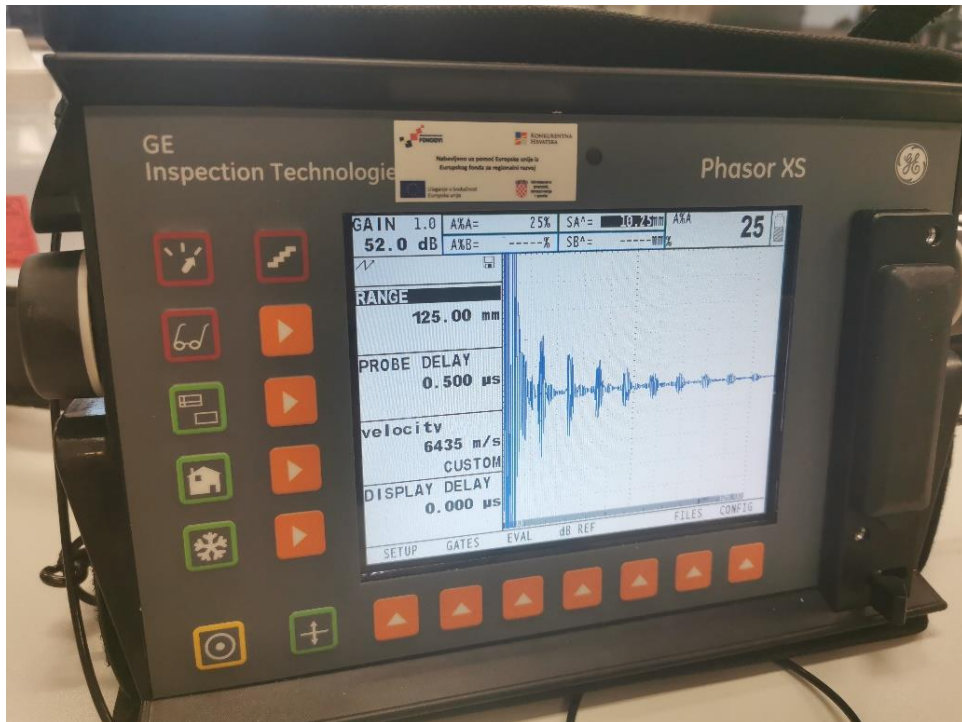


Slika 55: Blenda siječe prva 2 signala (Izradio autor)



Slika 56: Blenda siječe prvi signala (Izradio autor)

14. Nakon završene kalibracije dozvoljeno je mijenjanje izgleda grafa (HOME-SETUP-RECIEVER-SF). Na slici 57 prikazana jedna od mogućnosti izgleda grafa.



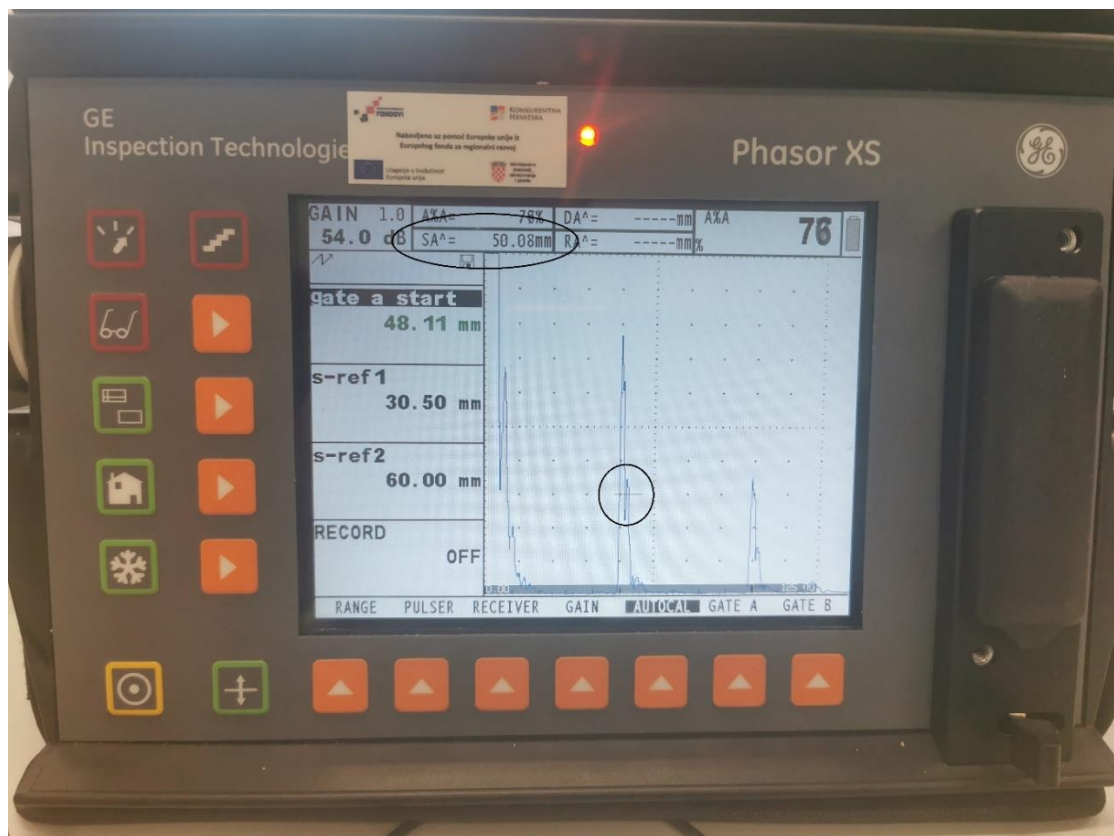
Slika 57: Alternativan prikaz grafa (Izradio autor)

15. Kod kalibracije, presijecanje signala je uočljivo kod promjene rezultata. Na slici 58 označeni rezultati na koje se odnosi pravilna kalibracija.



Slika 58: Rezultati na koje se odnosi kalibracija (Izradio autor)

16. Podatke sa grafa se očitava na način da se promatra putanja grafa do odbijanja i povratka signala. Tim principom vidljivo je kada se odbije na udaljenosti manjoj od debljine uzorka, što ukazuje na grešku unutar materijala, tj. ispitnog uzorka. Ako se radi o manjoj greški, signal može preskočiti tu grešku i pojaviti će se titraj koji ukazuje na manju grešku ili oštećenje unutar ispitnog elementa. Kod takvih titraja može se raditi o nepravilnosti u materijalu ili o pukotini. S obzirom da je za upravljanje uređajem potrebno veliko iskustvo i usavršavanje, nije s potpunom sigurnošću određeno o kojem se slučaju radi. Uređajem je izmjerena debljina ispitnog uzorka iznosi 50 mm. Zbog kalibracije i manjka iskustva dobiven je rezultat koji odstupa od točne debljine za 0,08 mm (0,16%). Rezultat mjerenja debljine je prikazan na slici 59. Označena debljina je dobivena ispitivanjem.



Slika 59: Debljina uzorka dobivena ispitivanjem i blenda A (Izradio autor)

Nakon provedenih ispitivanja ultrazvučnom kontrolom primjenom uređaja Phasor XS, potvrđeno je kako rukovanje nije jednostavno i kako je uistinu potrebno mnogo iskustva i usavršavanja za interpretiranje rezultata i poznavanje svih mogućih varijabli koje se

na uređaju mogu podesiti. Metoda je nepogodna za testiranje složenijih oblika i uzoraka, pogotovo kada operater nije uvježban za korištenje uređaja. Neke uzorke koji imaju premaze nije moguće ispitati jer ispitivanje kroz 1 površine s premazima prigušuje signal. Sam način rada Phased Array se pokazao kompliciranim za korištenje bez pomoći školovanog operatera. Kontroliranje zavara ovim uređajem je definitivno brza metoda, bez potrebe pripremanja uzorka ili elementa za testiranje. Iako je metoda korisna i brza, bez operatera nije moguće dobiti kvalitetne i jasne rezultate testiranja. Bez obzira na taj nedostatak ova metoda se uvelike primjenjuje pri kontroli zavarenih spojeva te je posebno prikladna za otkrivanje pukotina, ali i drugih vrsta grešaka.

5. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme, u građevinarstvu se sve češće koriste nerazorne metode ispitivanja materijala, elemenata i zavara u konstrukcijama. Kontrole se provode radi osiguravanja kvalitete u proizvodnji materijala, kontrole kvalitete pri izvedbi konstrukcija i kvalitete kod izvedbe zavara, ali i radi određivanja svojstava navedenih elemenata. Tim svojstvima je moguće odrediti je li uloženi iznos sredstava na način da se utvrdi postotak iskoristivosti, jesu li elementi u konstrukciji predimenzionirani ili nisu dovoljnih dimenzija. Takvim informacijama se povećava kvaliteta konstrukcije i cjelovite građevine i zadovoljstvo klijenata.

Prednosti takvih ispitivanja su mnogobrojne, od mogućnosti ponavljanja ispitivanja u različitim vremenskim intervalima na istim uzorcima ili mjestima, do prikupljanja i analiziranja promjena kroz neki vremenski period. Na istim uzorcima ili mjestima moguće je provesti više vrsta nerazornih ispitivanja u krajnjem slučaju i razornih ispitivanja čime se dobiva potpunija i detaljnija slika o strukturalnim svojstvima materijala ugrađenih u nekoj konstrukciji.

U radu su predstavljene razorne i nerazorne metode ispitivanja koja se najčešće provode u struci te njihove prednosti i mane koje odlučuju koje ispitivanje je najbolje provesti na pojedinom dijelu konstrukcije, ovisno o vremenu, raspoloživim metodama i uvjetima na mjestu gdje se konstrukcija nalazi.

Provedena su ispitivanja vizualnom, penetrantskom i ultrazvučnom metodom na četiri uzoraka. Vizualnom kontrolom se lako uočavaju velike pukotine i nepravilnosti. Penetrantska kontrola je relativno brza, jednostavna za izvođenje i jeftina, kojom se otkrivaju pukotine koje nije moguće utvrditi vizualnom kontrolom. Penetrantska kontrola je nastavak ili unapređenje vizualne kontrole jer nam olakšava uočavanje pukotina. Ultrazvučna kontrola je idealan način za otkrivanje nepravilnosti ili pukotina unutar materijala koje nije moguće uočiti vizualnom kontrolom ali zahtijeva iskustvo i školovanog operatera za rad na uređaju.

Na kraju ispitivanja zaključak je da su nerazorna ispitivanja sve potrebija, vrlo su efikasna, u većini slučajeva brza i jeftina te daju relativno točne rezultate u kratkom vremenskom razdoblju. Od izrazite je važnosti kontrolirati izvedbu i kvalitetu zavarenih spojeva na konstrukcijama kako bi se osigurala ne samo kvaliteta, već i produžio životni vijek samih konstrukcija. Kontrolom se osiguravaju idealni uvjeti na konstrukciji i sprječavaju deformacije ili urušavanja konstrukcije koje bi mogle biti pogubne ili nanijeti veliku štetu, ugroziti sigurnost ljudi te ih se treba na vrijeme spriječiti.

Literatura

- [1] Zavareni i zemljani spojevi,
<https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/05-ZavareniIZalemljeniSpojevi.pdf>, pregled 26.lipnja 2020.
- [2] *International standard ISO 2553*, Third edition 1992.
- [3] Krolo, Paulina, Predavanje *Spojevi i priključci*, Građevinski fakultet Rijeka 2020.
- [4] *Arizona performance offroad*, <https://www.azperformanceoffroad.com/offroad>
- [5] *Zavari*, <https://www.weld.com/>, pregled 1.7.2020.
- [6] *Kontrola i ispitivanje zavarenog spoja*,
https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/5.pdf, pregled 1.7.2020.
- [7] *Vlačno ispitivanje*, <https://hr.wikipedia.org/>, pregled 1.7.2020.
- [8] Prof. dr. sc. Banjad Pečur, Ivana, *Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu*,
- [9] Ivčić, Nikola, *Metode ispitivanja zavarenih spojeva bez razaranja i njihova primjena*, Sveučilište Sjever, 2016.
- [10] *Ispitivanje metalnih konstrukcija*, <http://www.metalogicinspection.com/services/visual-inspection/visual/>, pregled 1.7.2020.
- [11] Cvetković, Neven, *Primjena HRN EN ISO 3834-2i HRN EN1090-2 u izradi strojarskih konstrukcija*, Sveučilište Sjever 2016.
- [12] Hellier, Charles, *Handbook of nondestructive evaluation*, 2003.
- [13] *Kontrola kvalitete nakon zavarivanja*,
https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/kbr_met.html, pregled 1.7.2020.
- [14] *Uvod u magnetska ispitivanja*, <https://vgoinc.com/general/a-brief-introduction-to-magnetic-particle-testing>, pregled 1.7.2020.
- [15] Sladonja, Robert, *Ispitivanje materijala metodama bez razaranja*, Veleučilište u Karlovcu 2016.
- [16] Sedlaček, Marijan, *Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja*, Veleučilište u Karlovcu 2017.
- [17] *Phasor XS*, <https://portland-nk.ru/katalog/phasor-xs/>, pregled 1.7.2020.
- [18] *Phasor XS ispitivanje*, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=5133>, pregled 1.1.2020.
- [19] *Rezultati radiografske metode testiranja zavora*,
https://www.researchgate.net/figure/Results-of-radiographic-testing_fig3_324915768,

pregled 1.7.2020.

[20] *Akustična emisija*, https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.php,

pregled 1.7.2020.

[21] Doc. dr. Sc., Markučić, Damir, *Metode nerazornih ispitivanja*, https://www.fsb.unizg.hr/ndt/download/teh3_2003-04pred.pdf, pregled 1.7.2020.

[22] *Osnove praktičnog rada*, CeNI 2015.

[23] *Kalibracijski blokovi*, <http://imscalibration.com/eniso7963.html>, pregled 2.7.2020.

[24] Mendiković, Ivana, *Analiza čeličnih priključaka nosač-stup*, Građevinski fakultet u Rijeci 2018.

[25] *Phased array sonde*, <http://tofd-pa.ru/images/3-datchiki/katalog-datchikov-fap-ge-phaser-xs.pdf>, pregled 2.7.2020.

[26] *Phasor XS brošura*, <https://sestar.irb.hr/images/instrumenti/documents/80.pdf>, pregled 2.7.2020.

[27] *Konvencionalne sonde*, <https://www.aliexpress.com/item/927808302.html>, pregled 2.7.2020.

[28] *Metoda penetrantima*, <https://www.youtube.com/watch?v=s1tEP-Z3eZw>, pregled 2.7.2020.

[29] *Katalog laboratorijske opreme*, https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog_laboratorijske_i_terenske_opreme_GF_Rijeka.pdf, pregled 7.7.2020.

[30] *Katalog opreme za nerazorna ispitivanja*, <https://www.ideal.hr/prodajni-program>, pregled 9.7.2020.